F 923

KAT

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

Institut de Documentare Tehnică
BUCUREȘTI
OBMEN - C É
VYMĚ - W ANA
TAUSCH - CAMBIA

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

Ottmar Kloss
Kaufmann
Jena

ANUL IV
1954

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÎNE

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

Országos Műszaki
Könyvtár
TULAJDONA

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

ANUL IV
1954

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÎNE

COMITETUL DE REDACȚIE

ACADEMICIAN I. S. GHEORGHIU — redactor responsabil;
T. TĂNĂSESCU, membru corespondent al Academiei R.P.R.;
M. MARINESCU, membru corespondent al Academiei R.P.R.;
M. BERCOVICI, membru corespondent al Academiei R.P.R.;
GH. BĂRĂNESCU; C. DINCULESCU

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

Tomul IV 1954

SUMAR

Pag.

ELECTROENERGETICĂ

C. BUDEANU, Aspectul general fizic al fenomenelor reactive electrice şi electromecanice 7
ION S. ANTONIU, Măsurarea puterii şi energiei reactive 39
P. POSTELNICU, Asupra constantei de propagare a liniilor de telecomunicaţii 63

TERMOENERGETICĂ

EGY GEZA, Soluţii energetice pentru îmbunătăţirea cuptoarelor de prăjire a minereurilor de fier şi mangan 77
I. A. BADEA, Puterea electrică ce se poate obţine în grupuri de termoficare cu contrapresiune 95
C. ARAMĂ, Asupra limitelor de putere la funcţionarea cu petrol lampant a motoarelor de tractor 115
D. BUIMOVICI, Căldura reală de vaporizare a apei din lignit 121
NOTE 133
RECENZII 139

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÎNE

ACADEMIE DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE
INSTITUT D'ÉNERGÉTIQUE

ÉTUDES ET RECHERCHES D'ÉNERGÉTIQUE

Tome IV 1954

SOMMAIRE

Page

ÉLECTROÉNERGÉTIQUE

C. BUDEANU, Aspect général physique des phénomènes réactifs, électriques et électromécaniques 7
ION S. ANTONIU, Mesure de la puissance et de l'énergie réactive..... 39
P. POSTELNICU, Sur la constante de propagation des lignes de télécommunication 63

THERMOÉNERGÉTIQUE

EGY GEZA, Solutions énergétiques pour l'amélioration des fours à griller les minerais de fer et de manganèse 77
I. A. BADEA, Puissance électrique pouvant être obtenue dans des groupes turbo-alternateurs à contre-pression 95
C. ARAMĂ, Des limites de puissance des moteurs de tracteurs fonctionnant au pétrole lampant 115
D. BUIMOVICI, La chaleur réelle de vaporisation de l'eau du lignite 121
NOTES..... 133
COMPTES RENDUS 139

ÉDITIONS DE L'ACADÉMIE DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE

АКАДЕМИЯ РУМЫНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ

ТРУДЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ЭНЕРГЕТИКЕ

Том IV 1954

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

К. БУДЯНУ, Общая физическая картина электрических и электромеханических реактивных явлений 7
И. С. АНТОНИУ, Измерение реактивной мощности и энергии 39
П. ПОСТЕЛЬНИКУ, О постоянной распространения по линиям дальних передач 63

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Е. ГЕЗА, Решения энергетических вопросов, связанных с усовершенствованием печей, обжигающих железную и марганцевую руду 77
И. А. БАДЯ, Электрическая сила, полученная в теплофикационных группах с противодавлением 95
К. АРАМЭ, О пределах мощности тракторных двигателей при работе на керосине 115
Д. БУЙМОВИЧ, Истинная теплота испарения воды, содержащейся в лигните 121
ЗАМЕТКИ 133
РЕЦЕНЗИИ 139

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ РУМЫНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul IV, 1954

ELECTROENERGETICĂ

ASPECTUL GENERAL FIZIC AL FENOMENELOR REACTIVE ELECTRICE ŞI ELECTROMECANICE

DE

C. BUDEANU

I. CONSIDERAŢII PRELIMINARE

1. Importanţa covîrşitoare a fenomenelor reactive care intervin în condiţiile de amenajare, de funcţionare şi de exploatare ale instalaţiilor electrice, ne obligă să punem întrebarea: care este *aspectul fizic* al acestor fenomene?

Toate metodele tehnice corespunzătoare acestei probleme trebuie să se încadreze în proprietăţile fizice respective.

Obiectul acestei preocupări se extinde, în mod inevitabil, asupra mărimii însăşi de *putere reactivă*, prin care se caracterizează în mod obişnuit fenomenele reactive.

2. Pînă în prezent s-au emis diverse puncte de vedere în cadrul acestei probleme, mergînd pînă la cele două limite extreme, care ne prezintă puterea reactivă fie ca o *mărime fizică*, fie ca o simplă *mărime de calcul*, lipsită de o semnificaţie fizică concretă.

Considerăm ambele aceste puncte de vedere prea categorice, fără a putea aduce precizări utile în problema care ne interesează.

Noţiunea de mărime fizică însăşi nu e totdeauna clară. Multe mărimi au fost considerate «mărimi fizice» şi totuşi azi este recunoscut că ele sînt lipsite de o *realitate fizică*. Este cazul masei magnetice şi a altor mărimi. Pe de altă parte, sînt mărimi despre care ştim că nu sînt o *realitate fizică* şi care au totuşi o importantă semnificaţie fizică. Este cazul valorilor eficace de tensiune şi curent.

În curent alternativ, singura noţiune de putere care conţine, în adevăr, o *realitate fizică* este *puterea instantanee*. Totuşi nimeni nu s-a gîndit a trata puterea activă, *dedusă din valoarea instantanee*

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T pdt = UI\cos\varphi \tag{1}$$

ca o simplă mărime de calcul.

Ceea ce interesează însă, din punct de vedere fizic, pentru o mărime, este faptul dacă ea are sau nu calitatea de a *caracteriza* anume *fenomene fizice*, anume *realităţi fizice*. În caz afirmativ, se poate spune despre acea mărime că ea are un *aspect fizic*, are o *natură fizică*.

În cazul de faţă, ceea ce ne interesează este de a examina şi preciza care sînt fenomenele fizice pe care le poate *caracteriza* mărimea de putere reactivă, cu ce *fenomene fizice* este în corelaţie această mărime, care este deci *conţinutul* său fizic.

Introducerea în ştiinţă a mărimii de putere reactivă s-a făcut pe baza unei definiţii. Evident, după cum vom vedea, se pot imagina şi alte expresii ca rezultat al unor alte definiţii, spre a caracteriza fenomenul reactiv. S-a apreciat însă că mărimea definită prin

$$Q = UI \sin \varphi, \tag{2}$$

corespunde unui maximum de conţinut fizic al fenomenului reactiv.

Vom vedea de asemenea cum, tocmai pe baza proprietăţilor ei, această expresie se poate generaliza şi în acelaşi timp se poate adapta la diferitele situaţii particulare.

În capitolele ce urmează, vom examina corelaţia între mărimea de *putere reactivă* şi diverse aspecte ale realităţilor fizice, pe care această mărime le caracterizează.

II. CORELAŢIA PUTERII REACTIVE CU PUTERILE INSTANTANEE

3. Fie un sistem monofazat sinusoidal, care în punctele $A-B$ ale secţiei Σ are tensiunea u instantanee şi curentul i instantaneu (fig. 1) cu expresiile

$$\left.\begin{aligned} u &= \sqrt{2}\, U \sin (\omega t + \alpha) \\ i &= \sqrt{2}\, I \sin (\omega t + \alpha - \varphi). \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

Înlocuim curentul i prin $i = i' + i''$ în care i' şi i'' componentele de curent în fază şi în cuadratură cu tensiunea u au valorile

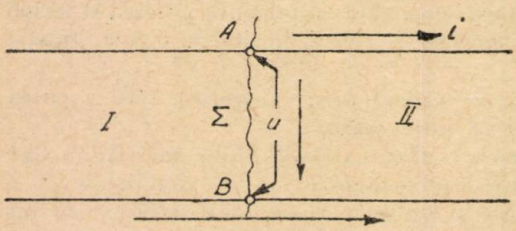


Fig. 1

$$\left.\begin{aligned} i' &= \sqrt{2}\, I \cos \varphi \cdot \sin (\omega t + \alpha) \\ i'' &= -\sqrt{2}\, I \sin \varphi \cdot \cos (\omega t + \alpha). \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

În aceste condiţii, puterea instantanee străbătînd secţiunea Σ devine la rîndul său

$$p = u \cdot i = p' + p'', \tag{5}$$

în care cei doi termeni componenţi de putere au expresiile

$$\left.\begin{aligned} p' &= UI \cos \varphi \, [1 - \cos 2 (\omega t + \alpha)] \\ p'' &= -\, UI \sin \varphi \sin 2 (\omega t + \alpha) = UI \sin \varphi \cos 2\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{4}\right). \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

Componenta p' este permanent de acelaşi semn. Ea are o valoare medie reprezentînd puterea activă

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\,dt = \frac{1}{T}\int_0^T p'\,dt = UI \cos \varphi. \tag{}$$

Componenta p'' reprezintă o putere instantanee periodică alternativă, avînd deci o valoare medie nulă (tocmai pentru că nu corespunde unei puteri active), dar avînd o amplitudine egală cu puterea reactivă

$$Q = UI \sin \varphi. \tag{8}$$

Parametrul α depinde de originea de timp adoptată arbitrar.

Pentru cazurile particulare de origine de timp, adoptate astfel încît să avem: $\alpha = 0$ sau $\alpha = \frac{\pi}{2}$, puterile instantanee date prin relaţia (6), cît şi valorile de curent şi tensiune exprimate prin relaţia (3) devin

$$\begin{aligned}
&\alpha = 0 && \alpha = \frac{\pi}{2} \\
u = {} & \ldots\ldots \sqrt{2}\, U \sin \omega t \ldots\ldots\ldots\ldots \sqrt{2}\, U \cos \omega t \\
i = {} & \ldots\ldots \sqrt{2}\, I \sin (\omega t - \varphi) \ldots\ldots\ldots \sqrt{2}\, I \cos (\omega t - \varphi) \\
p' = {} & \ldots\ldots UI \cos \varphi\, [1 - \cos 2\omega t] \ldots UI \cos \varphi\, [1 + \cos 2\omega t] \\
p'' = {} & \ldots\ldots - UI \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t \ldots\ldots UI \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t.
\end{aligned} \tag{9}$$

În figura 2 se redau diagramele mărimilor u, i, p', p''.

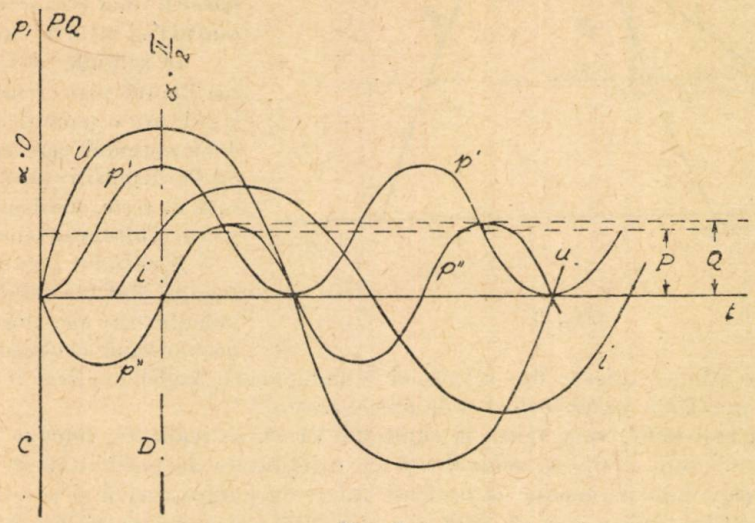


Fig. 2

Ordonatele C şi D reprezintă cele două origini de timp adoptate, corespunzînd la parametrii

$$\alpha = 0 \quad \text{şi} \quad \alpha = \frac{\pi}{2}.$$

4. Putem însă, tot aşa de bine, în expresiile (3) să descompunem, nu curentul, ci tensiunea u, în două componente: una u' în fază cu curentul şi alta u'', în cuadratură cu curentul, obţinînd astfel sistemul

$$\left.\begin{aligned}
u &= \sqrt{2}\, U \cos \varphi\, [\sin (\omega t + \alpha - \varphi)] + \sqrt{2}\, U \sin \varphi\, [\cos (\omega t + \alpha - \varphi)] \\
i &= \sqrt{2}\, I \sin (\omega t + \alpha - \varphi).
\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

Şi în acest caz, puterea instantanee $p = u \cdot i$ se descompune în doi termeni p' şi p'', analog relaţiei (5), termeni care însă de data aceasta au expresiile

$$\left.\begin{aligned} p' &= UI \cos \varphi \,[1 - \cos 2(\omega t + \alpha - \varphi)] \\ p'' &= UI \sin \varphi \cdot \sin 2(\omega t + \alpha - \varphi). \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

Aceşti termeni au proprietăţi analoge cu acei din cazul precedent şi ne scot în evidenţă aceleaşi valori de putere activă şi reactivă

$$P = UI \cos \varphi \quad \text{şi} \quad Q = UI \sin \varphi.$$

Parametrul α are aceeaşi semnificaţie ca în cazul precedent. Astfel putem reconstitui un tablou analog cu acela din sistemul (9) şi o diagramă analogă cu aceea din figura 2.

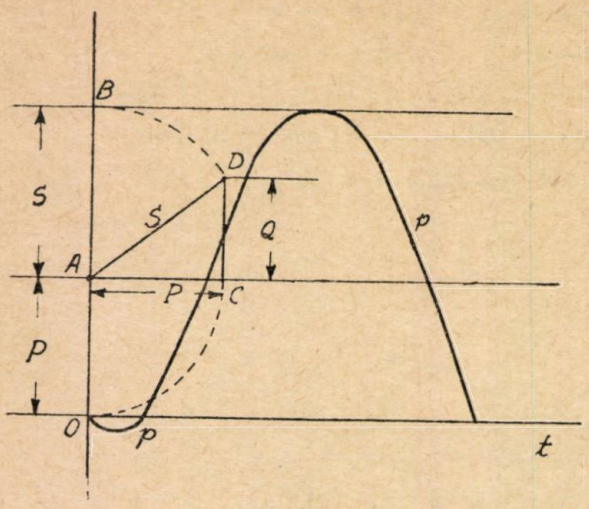


Fig. 3

5. Precizăm că descompunerea făcută prin relaţiile (4), (5) şi (6) are o semnificaţie fizică numai dacă sistemul este echivalent cu un dispozitiv de două aparate în *paralel*, unul străbătut de curentul i' şi altul de curentul i''.

În schimb, descompunerea făcută prin relaţiile (10) şi (11) are o semnificaţie fizică dacă sistemul este echivalent cu un dispozitiv de două aparate în *serie*, unul sub tensiunea u' şi altul sub tensiunea u''.

Esenţialul este că ambele sisteme sînt la rîndul lor echivalente între ele. Observatorul necunoscînd constituţia reţelei, poate adopta oricare din cele două descompuneri. Ambele ne scot în evidenţă aceleaşi expresii de *putere activă* şi de *putere reactivă*.

Ceva mai mult, vom vedea la capitolul VI că, în realitate, reţeaua este constituită mult mai complex, echivalentă cu o infinitate de posibilităţi de montaje mixte. Toate însă ne conduc la aceleaşi valori de putere activă şi reactivă.

6. Se poate arăta însă că, fără nici o ipoteză a descompunerii tensiunii u sau a curentului i, simpla cunoaştere a diagramei puterii instantanee p ne poate identifica valorile de putere activă, aparentă, reactivă.

Astfel, pornind de la expresiile instantanee (3), puterea instantanee străbătînd secţiunea Σ devine

$$p = u \cdot i = UI \cos \varphi - UI \cos (2\omega t + 2\alpha - \varphi). \tag{12}$$

În figura 3 redăm diagrama expresiei p, în care se vede uşor că avem

$$\overline{OA} = UI \cos \varphi = P$$

$$\overline{AB} = UI = S.$$

Realizăm astfel construcţia triunghiului dreptunghi ACD. În mod grafic, din diagrama puterii instantanee, deducem prin acest triunghi

$$\left.\begin{array}{ll} \text{Puterea activă} & P = \overline{OA} = \overline{AC} \\ \text{Puterea aparentă} & S = \overline{AD} = \overline{AB} \\ \text{Puterea reactivă} & Q = \overline{CD} = \sqrt{S^2 - P^2} = UI \sin \varphi. \end{array}\right\} \tag{13}$$

7. Consideraţiile expuse în acest capitol, pe care le vom completa în capitolele următoare, scot în evidenţă faptul că expresia puterii instantanee, reprezentînd o realitate fizică, poate identifica în mod univoc valoarea puterii reactive. Între puterea reactivă şi puterea instantanee există o corelaţie fizică.

III. PROPRIETATEA DE CONSERVARE

8. Proprietatea de conservare a puterii reactive, în mod similar şi simetric, în condiţii uzuale, cu conservarea puterii active, este cunoscută. Această proprietate de conservare contribuie a conferi puterii reactive o autoritate fizică.

Reamintim pe scurt, în cele ce urmează, demonstraţia pe care am dat-o acestei proprietăţi de conservare, bazîndu-ne pe proprietăţile valorilor instantanee de tensiune, de curent şi de putere şi deci bazîndu-ne tocmai pe realităţile fizice ale acestor mărimi.

Fie o reţea electrică formată dintr-un număr de laturi, fără contacte alunecătoare şi străbătută de curenţi sinusoidali. Notăm prin U_n tensiunea între nodurile adiacente ale laturii n şi prin i_n curentul din aceeaşi latură. Avem deci

$$\left.\begin{array}{l} u_n = \sqrt{2}\, U_n \sin(\omega t - \alpha_n) \\ i_n = \sqrt{2}\, I_n \sin(\omega t - \beta_n) \\ \varphi_n = \beta_n - \alpha_n. \end{array}\right\} \tag{14}$$

Aplicînd prima lege a lui Kirchhoff la fiecare nod k sub forma $\Sigma_k i_n = 0$ şi impunînd condiţia de valabilitate pentru oricare moment t, rezultă că ea se transformă în două relaţii

$$\left.\begin{array}{l} \Sigma_k i'_n = 0 \quad \text{în care} \quad i'_n = \sqrt{2}\, I_n \cos \beta_n \cdot \sin \omega t \\ \Sigma_k i''_n = 0 \quad \text{în care} \quad i''_n = \sqrt{2}\, I_n \sin \beta_n \cdot \cos \omega t. \end{array}\right\} \tag{15}$$

Reţeaua poate fi deci considerată ca fiind formată din suprapunerea a două reţele, una cu curenţi de forma i'_n şi alta cu curenţi de forma i''_n. Aceste două reţele au acelaşi număr de laturi, aceleaşi potenţiale la noduri şi deci aceleaşi tensiuni pe laturi.

Interpretarea dată prin relaţia (15) este fizic posibilă, întrucît putem oricînd materializa constructiv toate laturile celor două reţele, spre a se îndeplini condiţia de mai sus. Iar suprapunerea celor două reţele echivalează cu înlocuirea fiecăreia din laturile reţelei iniţiale, prin două laturi în paralel, construite astfel ca fiecare din cele două laturi să fie străbătute de curenţii i'_n şi i''_n.

Pentru fiecare din cele două reţele avem conservarea puterilor instantanee respective pentru toate cele S laturi

$$\left.\begin{aligned} \Sigma_s p' &= \Sigma_s u_n \cdot i'_n = 0 \\ \Sigma_s p'' &= \Sigma_s u_n \cdot i''_n = 0. \end{aligned}\right\} \tag{16}$$

Intrucît acest sistem trebuie să fie valabil, oricare ar fi momentul t, implicit reiese că în întreaga reţea sînt satisfăcute condiţiile

$$\left.\begin{aligned} \Sigma_s U_n I_n \cos \alpha_n \sin \beta_n = 0 \quad ; \quad \Sigma_s U_n I_n \sin \alpha_n \cdot \cos \beta_n = 0 \\ \Sigma_s U_n I_n \cos \alpha_n \cos \beta_n = 0 \quad ; \quad \Sigma_s U_n I_n \sin \alpha_n \cdot \sin \beta_n = 0. \end{aligned}\right\} \tag{17}$$

Două cîte două din acest grup formează sistemele:

$$\left.\begin{aligned} \Sigma_s U_n I_n \cos (\beta_n - \alpha_n) = \Sigma_s U_n I_n \cos \varphi_n = \Sigma_s P_n = 0 \\ \Sigma_s U_n I_n \sin (\beta_n - \alpha_n) = \Sigma_s U_n I_n \sin \beta_n = \Sigma_s Q_n = 0. \end{aligned}\right\} \tag{18}$$

Obţinem astfel pentru întreaga reţea, simultan şi simetric, conservarea separată atît a puterilor active P_n, cît şi a puterilor reactive Q_n.

Raţionamentul de mai sus, introducînd şi potenţiale la noduri, include implicit şi principiul legii a II-a a lui Kirchhoff.

Observăm că principiul de conservare este o consecinţă atît a proprietăţilor mărimilor instantanee, reprezentînd deci realităţi fizice, cît şi a legilor Kirchhoff, care sînt ele însеşi legi de conservare, atribuind unei reţele posibilitatea de funcţionare.

Proprietatea de conservare este plină de consecinţe, atît fizice, cît şi tehnice. În concluzie o putere reactivă *cerută* într-o anumită latură a unei reţele, trebuie să fie *produsă* undeva pe reţea sau *primită* pe cale de transfer de la o reţea vecină.

Observăm că, concluzia de mai sus este valabilă, oricum ar fi construită reţeaua, cu rezistenţe, inductanţe, sau cu capacităţi.

Această proprietate de conservare rezumată în relaţiile (18) a condus la o importantă metodă de calcul în curenţi alternativi, denumită *metoda separaţiei puterilor*.

9. Principiul de conservare într-un fenomen de transfer, atît pentru puteri active cît şi reactive, este de asemenea o consecinţă fizică a proprietăţilor puterilor instantanee.

Fie, de exemplu, cazul unui transformator, reprezentînd de fapt, două circuite vecine, cuplate magnetic între ele.

Ecuaţiile clasice pentru acest caz sînt, după cum se ştie,

$$\left.\begin{aligned} u_1 &= R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ 0 &= u_2 + R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}, \end{aligned}\right\} \tag{19}$$

unde

R_1 şi R_2 reprezintă rezistenţele primară şi secundară;
L_1 şi L_2 reprezintă inductanţele totale primară şi secundară;
M reprezintă inductanţa mutuală.

Valorile instantanee ale lui u_1, u_2, i_1 şi i_2 se pot pune totdeauna sub forma

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= \sqrt{2}\, I_1 \cos \omega t \\ i_2 &= \sqrt{2}\, I_2 \cos (\omega t - \theta) \\ u_1 &= \sqrt{2}\, U_1 \cos (\omega t + \varphi_1) \\ u_2 &= \sqrt{2}\, U_2 \cos (\omega t - \theta + \varphi_2). \end{aligned}\right\} \tag{20}$$

Puterile instantanee constatate la *extremităţile circuitelor* se deduc din sistemul (20) şi se exprima sub forma

$$\left.\begin{aligned} p_1 &= u_1 i_1 = 2 U_1 I_1 \cos \omega t \cdot \cos (\omega t + \varphi_1) \\ p_2 &= u_2 i_2 = 2 U_2 I_2 \cos (\omega t - \theta) \cdot \cos (\omega t - \theta + \varphi_2) \end{aligned}\right\} \tag{21}$$

iar puterile instantanee din *interiorul circuitelor* se deduc din sistemele (19) şi (20) exprimîndu-se sub forma

$$\left.\begin{aligned} p_1' &= 2 (R_1 I_1^2 + M\omega I_1 I_2 \sin\theta) \cos^2 \omega t - (L_1 \omega I_1^2 + M\omega I_1 I_2 \cos\theta) \sin 2\omega t \\ p_2' &= -2 (R_2 I_2^2 - M\omega I_1 I_2 \sin\theta) \cos^2 (\omega t - \theta) + (L_2 \omega I_2^2 + M\omega I_1 I_2 \cos\theta) \sin 2 (\omega t - \theta). \end{aligned}\right\} \tag{22}$$

Pentru a scrie conservarea *puterilor instantanee*, identificăm sistemul (21) cu (22), pentru orice moment, ceea ce ne conduce la sistemele de ecuaţii

$$\left.\begin{aligned} U_1 I_1 \cos \varphi_1 &= R_1 I_1^2 + M\omega I_1 I_2 \sin\theta \\ U_2 I_2 \cos \varphi_2 &= - R_2 I_2^2 + M\omega I_1 I_2 \sin\theta \end{aligned}\right\} \tag{23}$$

$$\left.\begin{aligned} U_1 I_1 \sin \varphi_1 &= L_1 \omega I_1^2 + M\omega I_1 I_2 \cos\theta \\ U_2 I_2 \sin \varphi_2 &= - L_2 \omega I_2^2 - M\omega I_1 I_2 \cos\theta. \end{aligned}\right\} \tag{24}$$

Din aceste două sisteme deducem

$$\left.\begin{aligned} U_1 I_1 \cos\varphi_1 &= R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + U_2 I_2 \cos\varphi_2 \\ U_1 I_1 \sin\varphi_1 &= L_1 \omega I_1^2 + 2M\omega I_1 I_2 \cos\theta + L_2 \omega I_2^2 + U_2 I_2 \sin\varphi_2. \end{aligned}\right\} \tag{25}$$

Introducînd expresiile inductanţelor proprii totale L_1 şi L_2, cît şi a curentului magnetizant total I_m măsurat pe primar, sub forma

$$\left.\begin{aligned} L_1 &= \lambda_1 + \frac{W_1}{W_2} M \quad , \quad L_2 = \lambda_2 + \frac{W_2}{W_1} M, \\ I_m &= \sqrt{I_1^2 + \left(\frac{W_2}{W_1}\right)^2 I_2^2 + 2 \frac{W_2}{W_1} I_1 I_2 \cos\theta}, \end{aligned}\right\} \tag{26}$$

în care λ_1 şi λ_2 sînt inductanţele de dispersiune, reiese că ecuaţia a 2-a din sistemul (25) se poate scrie sub forma variantei

$$U_1 I_1 \sin \varphi_1 = \lambda_1 \omega I_1^2 + \lambda_2 \omega I_2^2 + M\omega \frac{W_1}{W_2} I_m^2 + U_2 I_2 \sin \varphi_2. \tag{27}$$

Interpretînd relaţiile obţinute mai sus (23), (24), (25), (26), (27), constatăm că $R_1 I_1^2$ şi $R_2 I_2^2$ reprezintă suma puterilor active consumate în interiorul transformatorului, $M\omega I_1 I_2 \sin\theta$ reprezintă puterea activă transmisă de primar fluxului comun, care este apoi retransmisă mai departe, integral secundarului. Fluxul comun

nu rămîne sediul nici unei cantităţi de putere activă. $L_1 \omega I_1^2 + 2M\omega I_1 I_2 \cos \theta + L_2 \omega I_2^2$ reprezintă puterea reactivă totală *consumată* în fluxul interior al transformatorului. Din acest total de putere reactivă, $\lambda_1 \omega I_1^2$ şi $\lambda_2 \omega I_2^2$ reprezintă puterile reactive consumate în inductanţele de dispersiune, iar $M\omega \frac{W_1}{W_2} I_m^2$ reprezintă puterea reactivă consumată de fluxul comun al transformatorului.

Observăm că în tot raţionamentul de mai sus, am presupus că I_m este în fază cu fluxul comun. Am neglijat deci pierderile active interioare hysterezis şi Foucault. Dacă am fi ţinut seama şi de aceste pierderi, membrul al 2-lea al ecuaţiei 1-a din sistemul (25) ar trebui completat cu termenul p corespunzător.

Prin analiza mai sus făcută, regăsim astfel principiul de conservare al puterilor active şi reactive în fenomenul de transfer dedus exclusiv din proprietăţile de conservare ale puterilor instantanee. Corelaţia fizică între mărimea de putere reactivă şi realitatea fizică a puterilor instantanee este de asemenea scoasă în evidenţă.

Relevăm de asemenea că, în fenomenul de transfer studiat, am neglijat fenomenul de radiaţie energetică bazat pe legile Maxwell, aşa cum se practică, de altfel, în metodele de calcul şi de construcţie ale transformatorilor industriali. Avem tot dreptul de a neglija radiaţia, întrucît distanţa d între primar şi secundar e foarte mică, Raportul $\frac{d}{\lambda}$ e neglijabil, întrucît d în transformatorii industriali este de ordinul de mărime de 1 pînă la cca 2 cm, iar lungimea de undă $\lambda = 6000$ km la frecvenţa industrială $f = 50$ Hz. Am ţinut seamă numai de fenomenul de transfer zis static, ca şi cum el s-ar produce instantaneu, aşa cum e admis de sistemul de ecuaţii clasic (19).

Precizăm că toţi termenii care figurează în a doua ecuaţie a sistemului (25), cît şi aceia care figurează în relaţia (27) sînt efectiv puteri reactive. Termenul $U_1 I_1 \sin \varphi_1$ reprezintă puterea reactivă transmisă transformatorului de către primar; termenul $U_2 I_2 \sin \varphi_2$ reprezintă puterea reactivă transmisă circuitului secundar de către transformator.

Ceilalţi termeni reprezintă puterile reactive localizate în transformator şi anume în inductanţele totale, de dispersiune, mutuale ale transformatorului. Fiecare din aceşti termeni este la origine de forma $UI \sin \varphi$. Nu e vorba deci de termeni pe care noi îi introducem spre a echilibra o sumă algebrică.

Avem în mod efectiv de-a face cu un fenomen fizic de conservare. Situaţia este cu totul analogă cu termenii $R_1 I_1^2$ şi $I_2^2 R_2$, care reprezintă puterile active localizate în transformatori. Mai precizăm de asemenea că fenomenul de conservare, atît al puterilor reale, cît şi al celor reactive, printr-un transformator, este *riguros exact* oricare ar fi rezistenţele interne sau reactanţele interne (de dispersiune etc.) ale transformatorului.

Aceste concluzii rezultă atît teoretic cît şi experimental. Ele sînt confirmate prin operaţiile de exploatare, de compensare etc. Transformatorul este un receptor de putere reactivă care poate fi compensat atît pe primar cît şi pe secundar.

10. S-a obiectat uneori că într-un transfer între două regimuri de pulsaţii diferite puterea reactivă nu se conservă.

Noi considerăm că acest aspect al problemei mai comportă încă o punere la punct, care se bazează tot pe corelaţia cu proprietăţile puterilor instantanee, deoarece acestea, care stau la baza fenomenului reactiv, *se conservă*, oricare ar fi regimul de pulsaţii.

În adevăr, fie cazul cel mai expresiv, şi anume acela al unei maşini cu cîmp învîrtitor. Pentru o putere reactivă Q_2 constatată în secundarul maşinii sub o pulsaţie ω_2, corespunde în primar, sub o pulsaţie ω_1, o putere reactivă:

$$Q_1 = \frac{\omega_1}{\omega_2} Q_2. \tag{28}$$

Această concluzie rezultă de fapt din ecuaţia de transfer între primarul şi secundarul unei maşini asincrone. Această ecuaţie, de exemplu în cazul unei maşini bifazate, este pentru puterea reactivă

$$2U_1 I_1 \sin \varphi_1 = 2\lambda_1 \omega_1 I_1^2 + 2\lambda_2 \omega_1 I_2^2 + 2M\omega_1 \frac{W_1}{W_2} I_m^2 + \frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot 2U_2 I_2 \sin \varphi_2.$$

În realitate însă, chiar şi puterile active se găsesc în o relaţie analogă

$$P_1 = \frac{\omega_1}{\omega_2} P_2, \tag{29}$$

în care $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 - R_1 I_1^2$ reprezintă puterea activă transmisă de o fază primară cîmpului învîrtitor, iar $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 + R_2 I_2^2$ reprezintă puterea transmisă de cîmpul învîrtitor unei faze secundare.

Pentru a exprima conservarea puterilor active, trebuie să introducem şi *puterea constatată mecanic* de arborele motor, avînd următoarea valoare pentru fiecare fază

$$P = P_1 - P_2 = \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1}\right) P_1, \tag{30}$$

sau sub forma

$$M\omega I_1 I_2 \sin \theta = M\omega_1 I_1 I_2 \sin \theta - M\omega_2 I_1 I_2 \sin \theta, \tag{31}$$

în care $M\omega I_1 I_2 \sin \theta$ apare ca fiind puterea mecanică medie transmisă de fiecare fază a maşinii arborelui motor. M este inductanţa mutuală maximă, iar $\omega = \omega_1 - \omega_2$ este viteza maşinii (avînd cîte o pereche de poli). Puterile instantanee transmise mecanic arborelui motor fac să apară însă şi expresia

$$M\omega I_1 I_2 \cos \theta = M\omega_1 I_1 I_2 \cos \theta - M\omega_2 I_1 I_2 \cos \theta \tag{32}$$

care reprezintă diferenţa între puterile reactive constatate electric pe fiecare fază primară şi secundară (analog cu relaţia (31)).

Într-un sistem polifazat, cum e şi cazul motorului asincron, nu trebuie însă căutată corelaţia între *puterea reactivă totală* a sistemului polifazat şi suma totală a puterilor instantanee, care, după cum se ştie, într-un astfel de regim e constantă. Corelaţia trebuie căutată pe fiecare fază în parte, deoarece numai aici apare fenomenul oscilator, care stă la baza fenomenului reactiv. Arborele motor colectează însă numai puteri instantanee totale.

Puterile reactive de cele două părţi ale maşinii sînt puse în evidenţă numai pe fiecare fază primară şi secundară, pe baza unui efect de conservare electromecanic, între arborele motor şi *fiecare fază în parte*, atît pe primar, cît şi pe secundar. Astfel se explică, de ce diferenţa între puterile reactive primare şi secundare se datoreşte intervenţiei mecanice a arborelui motor prin $\omega = \omega_1 - \omega_2$.

Fie cazul la limită $\omega = \omega_1$ şi $\omega_2 = 0$. Este cazul unui motor sincron. Secundarul este redus la un curent continuu.

Puterea reactivă nu poate avea nici o corespondenţă în circuitul secundarului de curent continuu, dar poate avea o corespondenţă în puterile mecanice instantanee pe arborele motor. În cazul unui generator sincron monofazat funcţionînd într-un regim exclusiv reactiv (şi cu abstracţie de pierderi), puterile instantanee pe arborele motor sînt de forma

$$p = Q \sin 2\omega t,$$

unde Q reprezintă tocmai puterea reactivă a generatorului după deducerea fenomenelor interioare.

Aparenţa de neconservare a puterii reactive în acest caz se explică tocmai prin proprietăţile de conservare ale puterilor instantanee, datorite atît fenomenelor active, cît şi celor reactive.

Cînd ne ocupăm de puterile active ţinem seama de fenomenele mecanice pe arborele motor. Nu avem însă dreptul a ignora aceste fenomene mecanice, cînd ne ocupăm de fenomenele reactive.

IV. ASPECTUL ENERGETIC

11. Se pune întrebarea: cărei cauze fizice se datoresc puterile instantanee care sînt în corelaţie cu apariţia fenomenelor reactive.

Aparatele reactive sînt echivalente cu inductanţe proprii, inductanţele mutuale de cuplaj magnetic, condensatori. Ne propunem a examina din punct de vedere reactiv mecanismul de funcţionare al acestor aparate, pe care le considerăm deocamdată că posedă valori constante de L.M.C.

Vom vedea la capitolul VI situaţia care apare cînd aceste mărimi au valori variabile.

a) *Aparate echivalente cu inductanţe.* Fie $L_1, L_2 \ldots L_k$ inductivităţile tuturor aparatelor echivalente cu inductanţe.

Puterea reactivă absorbită de un aparat oarecare, de ordin k din această categorie, va fi

$$Q_k = L_k \omega I_k^2 = 2\omega \left(\frac{1}{2} L_k I_k^2 \right) = 2\omega W_{mk}, \tag{33}$$

în care W_{mk} este energia medie localizată în totalitatea cîmpului magnetic al acestui aparat.

b) *Aparate echivalente cu inductanţe mutuale, de cuplaj magnetic.* Am văzut că puterea reactivă consumată de un astfel de aparat este aceea dată la sistemul (25) sub forma $L_1 \omega I_1^2 + 2M\omega I_1 I_2 \cos \theta + L_2 \omega I_2^2$

Ne propunem însă a exprima puterea reactivă numai pentru inductanţa mutuală propriu-zisă, inductanţele de dispersiune fiind tratate separat şi încadrate în categoria a) de mai sus.

În aceste condiţii descompunem inductanţele totale în termenii săi componenţi sub forma

$$\left.\begin{aligned} L_1 &= \lambda_1 + \frac{W_1}{W_2} M = \lambda_1 + l_1 \\ L_2 &= \lambda_2 + \frac{W_2}{W_1} M = \lambda_2 + l_2, \end{aligned}\right\} \tag{34}$$

în care $l_1 = \frac{W_1}{W_2} M$ şi $l_2 = \frac{W_2}{W_1} M$ sînt ceea ce se numeşte de obicei, *inductanţe proprii utile.*

În consecinţă, puterea reactivă exclusivă a sistemului de cuplaj magnetic (fără inductanţele de dispersiune care se tratează separat) devine

$$Q = l_1 \omega I_1^2 + 2M\omega I_1 I_2 \cos \theta + l_2 \omega I_2^2 \tag{35}$$

iar l_1, l_2 şi M de data aceasta îndeplinesc condiţia $M = \sqrt{l_1 l_2}$.

Pe de altă parte, valoarea instantanee a energiei intrinsece cedată mediului magnetic de sistemul $l_1 l_2 M$ este

$$w = \frac{1}{2} l_1 i_1^2 + \frac{1}{2} l_2 i_2^2 + M i_1 i_2 \tag{36}$$

iar valoarea medie a acestei energii

$$W_m = \frac{1}{T} \int_0^T w dt = \frac{1}{2} l_1 I_1^2 + \frac{1}{2} l_2 I_2^2 + M I_1 I_2 \cos \theta. \tag{37}$$

Din relaţiile (35) şi (37) deducem puterea reactivă a unui sistem de inductanţă mutuală — cuplaj magnetic — de un ordin oarecare n sub forma

$$Q_n = 2\omega W_{mn}, \tag{38}$$

expresie analogă cu relaţia (33).

c) *Inductanţa liniilor şi a circuitelor electrice.* Liniile şi circuitele au şi ele cîte o inductanţă. De fapt, fiecare element de conductor intrînd în compoziţia unei linii sau unui circuit are un element de inductanţă dL, a cărei integrală ne dă inductanţa totală. Prin intermediul acestei inductanţe, liniile se încadrează în cazul a) de mai sus. În consecinţă, fiecare conductor de ordin i, intrînd în constituţia unei reţele, consumă o putere reactivă de forma

$$Q_i = 2\omega W_{mi}, \tag{39}$$

în care W_{mi} reprezintă energia medie cedată mediului magnetic de către conductorul de ordin i.

d) *Aparate echivalente cu un condensator.* Se ştie că puterea reactivă «consumată» de un condensator de un ordin oarecare r se exprimă astfel

$$Q_r = - C_r \cdot \omega U^2 = - 2\omega \left(\frac{1}{2} C_r \cdot U^2 \right) = - 2\omega W_{cr} \tag{40}$$

în care W_{cr} reprezintă energia medie cedată mediului electric al condensatorului. Această putere reactivă este negativă, deci nu este vorba de o putere reactivă «consumată», ci «produsă».

e) *Capacităţile liniilor.* Se ştie că între elementele corespunzătoare de pe liniile electrice se creează tuburi de forţe elementare de flux electric. Acest sistem constituie condensatori elementari, care se încadrează în cazul d) de mai sus.

Totalitatea acestor sisteme elementare de condensatori consumă o putere reactivă

$$Q_c = - 2\omega W_{ec} \tag{41}$$

în care W_{e_t} reprezintă energia medie cedată mediului electric de totalitatea liniilor unui sistem electric.

Puterea reactivă totală a unui sistem energetic se poate astfel stabili pe baza principiului conservării puterii reactive din relaţiile de mai sus (33), (38), (39), (40), (41) sub forma

$$\left.\begin{aligned} Q &= \Sigma Q_k + \Sigma Q_n + \Sigma Q_t + \Sigma Q_r + \Sigma Q_e \\ Q &= 2\omega (W_m - W_e). \end{aligned}\right\} \tag{42}$$

Puterea reactivă debitată de o sursă electrică (generator, centrală etc.) este deci egală cu valoarea dată de relaţia (42), în care W_m şi W_e reprezintă totalitatea energiilor medii cedate cîmpurilor magnetice şi electrice ale întregului sistem, iar 2ω reprezintă pulsaţia de oscilaţie a acelei energii între cîmpurile electrice-magnetice şi sursa respectivă.

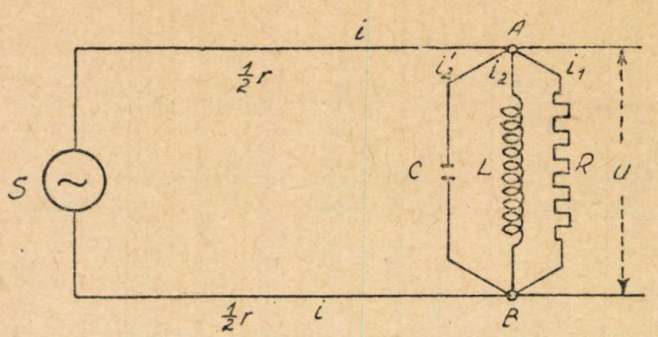


Fig. 4

De asemenea, puterea reactivă care străbate o secţiune Σ a unei linii (fig. 1) în sensul săgeţii, este egală cu

$$Q = UI \sin \varphi = 2\omega (W_m - W_e), \tag{43}$$

în care U şi I reprezintă valorile eficace de tensiune şi curent la secţia Σ, φ unghiul de defazaj al curentului I faţă de tensiunea U considerate cu semnele din figura 1, iar W_m şi W valorile medii de energie intrinsecă transmise pe linie dinspre sectorul I către cîmpurile magnetice şi electrice ale sectorului II.

Caracterizarea fizică a puterilor reactive văzută sub prisma relaţiilor (42) şi (43) este evidentă, întrucît atît W_m, W_e cît şi 2ω au o semnificaţie fizică precisă.

12. Relaţiile (42) şi (43) ne dau o indicaţie asupra compensării însăşi a fenomenelor reactive. Întrucît energiile W_m şi W_e nu se pot anula, deoarece nu avem linii fără cîmpuri magnetice şi electrice, se vede că putem realiza o compensare numai în următoarele condiţii

a) dacă se realizează $W_m = W_e$;

b) dacă se reduce la zero valoarea pulsaţiei ω, adică transmisia de energie să se facă în curent continuu.

Ne propunem a releva mai de aproape rolul aspectului energetic şi al puterilor instantanee într-un fenomen de compensare.

Fie o sursă S alimentînd în AB un receptor echivalent cu o rezistenţă R în paralel cu o inductanţă L (fig. 4). Avem de-a face cu un *aparat electromagnetic*. Caracteristica esenţială a acestor categorii de aparate rezidă în funcţionarea lor

legată de prezenţa unui cîmp magnetic, în corelaţia cu valorile de curent absorbite din reţea.

Regimul energetic al aparatului este bazat pe un transfer sau un transport între aparat şi reţea pe baza principiului conservării energiei.

Valoarea tensiunii instantanee de alimentare a aparatului o putem pune totdeauna sub forma

$$u = \sqrt{2}\, U \sin(\omega t + \alpha), \tag{44}$$

în care U este valoarea eficace, presupusă constantă la punctul de alimentare, iar α un parametru fixat prin originea arbitrară adoptată pentru timp.

Valoarea totală a energiei instantanee transmisă între reţea şi aparat se compune din

$$w = w_1 + w_2, \tag{45}$$

în care w_1 este energia, care avînd un caracter periodic, reprezintă totuşi un transport de energie necesară spre a efectua un lucru mecanic sau spre a acoperi anume fenomene energetice (efecte Joule-Lenz, hysterezis, curenţi turbionari, frecări mecanice etc.).

w_2 reprezintă energia oscilantă între cîmpul magnetic şi reţea.

Aceste energii variabile dezvoltă la bornele aparatului puterile instantanee

$$p = \frac{dw_1}{dt} + \frac{dw_2}{dt} = p_1 + p_2. \tag{46}$$

Aceste valori instantanee de energie şi puteri sînt caracterizate prin proprietăţile

$$\begin{cases} \displaystyle\int_0^T dw_i & \text{poate creşte permanent cu timpul;} \\ \dfrac{1}{T}\displaystyle\int_0^T w_2\, dt = W_m & \text{media energiei oscilante în timpul unei perioade avînd deci valoarea finită;} \\ \dfrac{1}{T}\displaystyle\int_0^T p\, dt = \dfrac{1}{T}\int_0^T p_1\, dt = P & \text{este media puterii instantanee sau puterea activă.} \\ \dfrac{1}{T}\displaystyle\int_0^T \dfrac{dw_2}{dt}\, dt = \dfrac{1}{T}\int_0^T p_2\, dt = 0. & \end{cases} \tag{47}$$

Aceste proprietăţi ne conduc la valoarea complexă cunoscută a puterii aparente alimentînd aparatul electromagnetic

$$\overline{S} = P + j\, 2\omega\, W_m = P + jQ \tag{48}$$

în care P este puterea activă, iar $Q = 2\omega\, W_m$ puterea reactivă, avînd deci o semnificaţie energetică bine definită.

În această categorie se cuprinde orice aparat echivalent cu o inductanţă, cu o maşină sincronă, cu o maşină asincronă etc.

Valorile instantanee ale energiei w_2 şi ale puterii p_2, ţinînd seama de expresia tensiunii (44), se prezintă sub forma

$$w_2 = \frac{Q}{2\omega}[1 + \cos 2(\omega t + \alpha)] = W_m[1 + \cos 2(\omega t + \alpha)]$$
$$p_2 = Q \cos 2\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{4}\right) = 2\omega W_m \cos 2\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{4}\right) \tag{49}$$

Cu w_2 şi W_m sînt notate energiile magnetizante necesare aparatului respectiv.

Potrivit relaţiilor (47) regăsim pentru W_m valorile cunoscute în diferite cazuri particulare, ca de exemplu

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2 \tag{50}$$

în cazul unei simple inductanţe L constante, străbătute de un curent de valoare eficace I

$$W_m = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M I_1 I_2 \cos \theta + \frac{1}{2} L_3 I_3^2 \tag{51}$$

în cazul unui transformator, cu L_1 şi L_2 reprezentînd inductanţele totale primare şi secundare, M inductanţa mutuală, I_1 şi I_2 valorile eficace ale curenţilor primar şi secundar, θ unghiul lor de defazaj, L_3 o inductanţă legată pe linia secundară şi I_3 curentul eficace care o străbate.

Termenii P şi Q din relaţia (48) au semne algebrice, potrivit sensurilor de circulaţie ale puterilor active şi reactive respective. Dacă notăm prin $\overline{S}$ puterea complexă *debitată* de reţea sau primită de aparat, P şi Q fiecare în parte sînt pozitive cînd circulaţia lor se face de la reţea la aparat şi invers.

În cazul unui motor sincron subexcitat, W_m este pozitiv ca şi Q, motorul primeşte dela reţea o energie magnetizantă medie şi deci o putere reactivă pozitivă.

În regim *supraexcitat* de funcţionare, energia magnetizantă medie W_m primită de la reţea este negativă, circulaţia energiei magnetizante medii făcîndu-se în sens invers.

Energia w_2 şi puterea p_2 au de data aceasta la bornele aparatului valorile instantanee

$$w_2 = -W_m[1 + \cos 2(\omega t + \alpha)]$$
$$p_2 = -2\omega W_m\left[\cos 2\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{4}\right)\right] = Q \cos 2\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{4}\right) \tag{52}$$

Puterile instantanee p_2 sînt inverse faţă de acelea ale situaţiei din relaţia (49).

Puterea complexă la bornele aparatului devine

$$\overline{S} = P + jQ = P - j2\omega W_m. \tag{53}$$

Puterea reactivă este negativă, deci aparatul livrează pe reţea o putere reactivă.

Presupunem acum că în vederea compensării montăm între bornele AB o capacitate C sau un aparat echivalent corespunzător, constituind astfel un *aparat electrostatic*.

Funcţionarea acestor *aparate electrostatice* este legată de prezenţa unui cîmp electric, în corelaţie cu valorile de curent absorbite din reţea.

Şi de data aceasta ne găsim în prezenţa unui regim energetic oscilant.

Valorile instantanee ale energiei w'_2 şi puterii p'_2 dezvoltate la bornele de alimentare ale aparatului sub tensiunea U (relaţia 44) analoge cu w_2 şi p_2 (din relaţia 52) devin de data aceasta

$$\left.\begin{aligned} w'_2 &= -\frac{Q}{2\omega}[1-\cos 2(\omega t+\alpha)] = W_e[1-\cos 2(\omega t+\alpha)] \\ p'_2 &= Q\cos 2\left(\omega t+\alpha+\frac{\pi}{4}\right) = -2\omega W_e \cos 2\left(\omega t+\alpha+\frac{\pi}{4}\right) \end{aligned}\right\} \quad (54)$$

W_e reprezintă media energiei electrostatice instantanee transmise cîmpului electric al aparatului.

Puterea complexă primită de aparat de la reţea devine în acest caz

$$\overline{S} = P + jQ = P - j\,2\omega W_e \quad (55)$$

Aparatul electrostatic *primeşte* o putere activă P spre a acoperi pierderile de conducţiune în dielectric, dacă este cazul, dar primeşte o putere reactivă de *semn invers* aceleia primită de un aparat electromagnetic. Aceasta ne îndreptăţeşte a zice că un aparat electrostatic *primeşte* o putere reactivă negativă $Q = -2\omega W_e$. Fenomenul se petrece deci ca şi cum aparatul electrostatic *ar produce* şi *ar livra* reţelei o putere reactivă pozitivă, $2\omega W_e$. Circulaţia puterii reactive este de data aceasta de la *aparat spre reţea*, spre deosebire de cazul unui aparat electromagnetic, sau al unui motor sincron subexcitat, unde circulaţia puterii reactive este de la reţea la aparat.

În cazul unei capacităţi, puterea reactivă *produsă* de aparat are valoarea cunoscută

$$UI\sin\varphi = C\omega U\cdot U = C\omega U^2 = 2\omega W_e.$$

Energia electrostatică medie absorbită de la reţea de cîmpul electric al unui condensator este tot atît de pozitivă ca şi energia magnetizantă medie absorbită de cîmpul magnetic al unei inductanţe. Totuşi puterile reactive respective sînt de sens invers, pentru că oscilaţiile energiilor instantanee şi deci puterile instantanee respective sînt de sens invers, faţă de aceeaşi tensiune aplicată.

Energia instantanee totală w transmisă de reţea cîmpurilor magnetice şi electrice ale aparatelor L şi C reiese din relaţiile (49) şi (54).

$$w = w_2 + w'_2 = W_m + W_e + (W_m - W_e)\cos 2(\omega t+\alpha) = W_m + W_e + \frac{Q_m - Q_e}{2\omega}\cos 2(\omega t+\alpha)$$

în care reamintim că W_m şi W_e reprezintă valorile medii ale energiilor cedate cîmpurilor magnetice şi electrice ale aparatelor reactive L şi C.

Din analiza făcută în prezentul paragraf, reiese:

a) Energia *medie totală* a energiei primită de ambele aparate L şi C este $W_m + W_e$, adică suma energiilor medii ale fiecăruia din cele două aparate.

b) Din acest total oscilează între reţea şi aparate numai o cantitate de energie a cărei medie este

$$W_m - W_e = \frac{Q_m - Q_e}{2\omega}.$$

c) Acestei oscilaţii energetice îi corespunde puterea instantanee pe care o mai debitează sursa pentru fenomenul reactiv şi care are valoarea

$$\frac{dw}{dt} = p_2 + p'_2 = 2\omega\,(W_m - W_e)\,\cos\,2\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{4}\right)$$

d) Puterea reactivă pe care o mai debitează reţeaua se reduce la

$$Q = Q_m - Q_e = 2\omega\,(W_m - W_e)$$

Regăsim şi pe această cale expresia care scoate în evidenţă fenomenul de compensare.

e) Atîta timp cît $W_m > W_e$, avem de a face cu o compensare parţială. Dacă însă $W_m = W_e$ realizăm o compensare totală.

f) Toate constatările la care am ajuns aci sînt independente de parametrul α care este arbitrar, prin originea de timp adoptată.

g) În sfîrşit, precizăm că dezvoltarea matematică făcută în acest paragraf este riguros valabilă numai la aparate montate în serie sau paralel. Situaţia este mai complicată într-un montaj mixt oarecare. Însă după cum vom vedea la capitolul VI, concluziile rămîn valabile şi în cazul general.

13. Relaţiile (48), (55) ne conduc la o generalizare, care ne scoate în evidenţă o semnificaţie fizică mai profundă a fenomenelor reactive.

Energia W_m este de natură cinetică şi notăm cu T valorile sale instantanee. Energia W_e este de natură potenţială şi notăm cu U valorile sale instantanee. Puterea reactivă totală a unui sistem format din astfel de aparate electromagnetice şi electrostatice devine:

$$Q = 2\omega\,\frac{1}{T}\int_0^T (T - U)\,dt = 2\omega\,(T - U)_{\text{med}} \tag{56}$$

Reamintim însă că expresia

$$A = \int_{t_1}^{t_2} (T - U)\,dt \tag{57}$$

reprezintă «acţiunea» hamiltoniană. Această noţiune avînd la bază lucrările lui Maupertius (aproximativ prin 1745) şi apoi extinsă principiului celei *mai mici acţiuni* a căpătat o oarecare dezvoltare în mecanica analitică şi fizica teoretică. Constanta lui Planck h este tot o acţiune. Mărimile T şi U din relaţia (57) au fost considerate în cercetările respective ca fiind energiile cinetice şi potenţiale ale unui sistem fizic oarecare. Expresia $L = T - U$ care intră sub semnul integralei în relaţia (57) este de fapt funcţia lui Lagrange.

Într-un regim electromagnetic lipsit de energii mecanice oscilante, $(T-U)_{\text{med}} = W_m - W_e$ şi deci relaţia (56) se reduce la forma cunoscută:

$$Q = 2\omega\,(T - U)_{\text{med}} = 2\omega\,(W_m - W_e). \tag{58}$$

Pe de altă parte 2ω este pulsaţia de oscilaţie a energiilor instantanee care intră în componenţa puterilor reactive (relaţiile 56 şi 57) între aparatele respective şi reţea. Deci acest factor are şi el o semnificaţie fizică concretă. De asemenea din

relaţia (56) reiese că noţiunea de putere reactivă este susceptibilă şi de o semnificaţie de valoare instantanee sub forma

$$q = 2\omega\,(T - U). \tag{59}$$

Puterea reactivă apare ca fiind media

$$Q = \frac{1}{T}\int_0^T q\,dt. \tag{60}$$

Este deja demonstrat că expresia A din relaţia (57) se supune unei proprietăţi generale de conservare, proprietate care se extinde astfel şi asupra mărimii $(T - U)_{\text{med}}$ care intră în componenţa puterii reactive.

Fenomenele reactive apar astfel ca avînd o semnificaţie în corelaţie cu fenomene fizice mai generale.

14. Pe consideraţiile expuse la paragraful 13 s-a încercat a se trage concluzia că fenomenul reactiv ar putea fi caracterizat nu prin mărimea de *putere reactivă*, ci printr-o mărime de forma

$$\frac{1}{2\omega}\,Q = (T - U)_{\text{med}} = W_m - W_e$$

şi care ar avea aceeaşi expresie la orice pulsaţie şi deci şi în regim nesinusoidal.

Asupra acestei propuneri, atunci cînd ea a fost făcută, am prezentat rezervele şi obiecţiile noastre, care în esenţă cuprind următoarele:

Cu toată importanţa mare a noţiunii de *acţiune*, considerăm că această noţiune, singură, nu este capabilă a caracteriza complet fenomenul reactiv, aşa cum el intervine în electrotehnică.

Este adevărat că $(T - U)_{\text{med}} = W_m - W_e$ constituie o formă invariantă într-un sistem electric. Dar nu întotdeauna un invariant este capabil a caracteriza o anume manifestare fizică specială.

Astfel, de exemplu, o aceeaşi cantitate de energie reprezintă de asemenea un invariant faţă de o infinitate de regimuri *de puteri* pe care deplasarea acestei energii le poate provoca. Totuşi, nimeni nu s-a gîndit a suprima mărimea de putere spre a se limita numai la aceea de energie.

Toate efectele fenomenelor reactive sînt funcţii de $Q = 2\omega\,(W_m - W_e)$ şi nu numai de $W_m - W_e$. Este cazul pierderilor pe liniile de transport, al căderilor de tensiune, al regimului de puteri instantanee, al factorului de putere etc. Factorul 2ω intrînd în expresia puterii reactive are o semnificaţie fizică concretă, reprezentînd pulsaţia de oscilaţie a energiei între cîmpurile magnetice, respectiv electrice şi aparatele respective ale reţelei.

Mărimea $W_m - W_e$ poate avea o valoare şi în curent continuu, regim care totuşi este lipsit de orice fenomen reactiv.

În sfîrşit, substituirea puterii reactive prin $W_m - W_e$ ar fi comportat o modificare esenţială de definiţie fizică, ceea ce s-a discutat, dar nu s-a adoptat.

În consecinţă, puterea reactivă nu are pretenţia de a ştirbi cu nimic conţinutul noţiunii de *acţiune*. Dimpotrivă, folosind această mărime şi prin multiplicarea ei cu factorul 2ω obţinem o nouă mărime capabilă de a caracteriza într-un mod mai complet fenomenul reactiv.

V. PUTEREA REACTIVĂ ÎN APLICAŢIILE TEHNICE

15. Sînt cunoscute manifestările tehnice ale puterii reactive. Ne vom rezuma numai a reaminti aceste manifestări, care apar şi aici simetric cu acelea datorite puterii active:

α) *Expresia puterii aparente* $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

β) *Factorul de putere* $k = \dfrac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$.

γ) *Pierderile în liniile de transport* de exemplu în linii trifazate

$$p_1 = 3 r_1 I_1^2 = 3 r_1 \frac{S^2}{3U^2} = r_1 \frac{P^2}{U^2} + r_1 \frac{Q^2}{U^2}$$

în care cu p_1 este pierderea specifică (pe unitate de lungime) într-un punct al liniei, cu r_1 rezistenţa specifică în acelaşi punct al liniei, şi cu U tensiunea între faze în acelaşi punct.

Aceste pierderi constituie, în general, o gravă problemă tehnico-economică. Astfel, de exemplu, fie un sistem energetic avînd o putere instalată de 500 000 kW, funcţionînd cu un număr de ore de utilizare de 4 000 ore pe an sub un factor de putere mediu de $\cos \varphi = 0{,}7$.

Admitem, ceea ce este normal pentru aceste condiţii, un coeficient de pierderi în reţea de circa 15%, în care se includ pierderile în transformatorii ridicători şi coborîtori, în liniile de transport şi în reţeaua de distribuţie.

Dacă în acest sistem energetic, printr-un mijloc oarecare, reuşim a reduce parţial consumul şi transportul de putere reactivă, astfel încît factorul de putere să se ridice de la 0,7 la 0,9, pierderile de energie în reţea se reduc de la circa 300 000 000 kWh/an la circa 180 000 000 kWh/an. Economia de circa 120 000 000 kWh/an, care se realizează în aceste condiţii, echivalează cu circa 6 000 vagoane păcură pe an, sau 16 000 vagoane cărbuni pe an.

Toate aceste rezultate se amplifică în cazul unei mai mari puteri instalate şi a unei extinderi a electrificării.

δ) *Căderea de tensiune* pe linie este în general de forma

$$\Delta U = | U - U_0 | = f_1(P) + f_2(Q)$$

Însă într-un regim industrial obişnuit, relaţia de mai sus, capătă cu suficientă aproximaţie următoarea expresie

$$\Delta U = | U - U_0 | \cong R \frac{P}{U_0} + L\omega \frac{Q}{U_0} \tag{61}$$

ε) *Creşterea pierderilor prin efectul Joule-Lenz*, într-o linie, cauzată de un nou consumator.

Fie o linie transportînd o importantă putere aparentă, sub forma unui curent I_a cu un defazaj ψ. La această linie se racordează la un moment dat un nou consumator caracterizat prin curentul I cu un defazaj φ.

Curentul din linie creşte cu

$$\Delta I_a = I \cos(\psi - \varphi).$$

În consecinţă pierderile în linie cresc prin intervenţia noului consumator cu

$$\Delta p = R(I_a + \Delta I_a)^2 - RI_a^2 = 2RI_aI\cos(\varphi - \psi) + R(\Delta Ia)^2.$$

Întrucît în cazurile practice uzuale $\Delta I_a \ll I_a$, termenul II din membrul II este neglijabil faţă de termenul I, aşa încît relaţia de mai sus se reduce cu suficientă aproximaţie, la

$$\left.\begin{aligned} \Delta p &\cong 2RI_aI\cos(\varphi - \psi) = kUI\cos\varphi + k'UI\sin\varphi \\ \Delta p &\cong kP + k'Q \end{aligned}\right\} \qquad (62)$$

φ) În fenomenele practicii industriale, în general, puterea reactivă se manifestă printr-o *entitate proprie*, independentă faţă de aceea a puterii active.

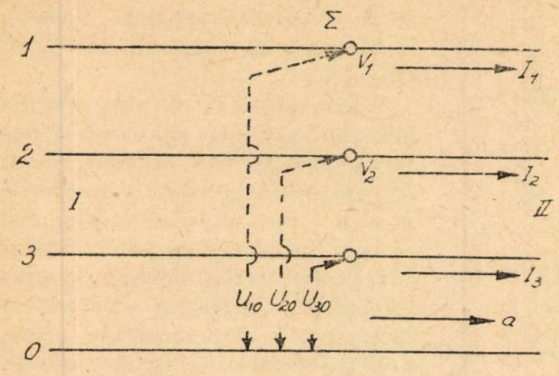


Fig. 5

Astfel, fie, de exemplu cazul obişnuit al unei linii trifazate complete, cu 3 fire.

Puterile activă şi reactivă, care străbat o anumită secţiune Σ în sensul *a*, indicat în figura 5, sînt:

$$\left.\begin{aligned} P &= U_{10}I_1\cos\varphi_1 + U_{20}I_2\cos\varphi_2 + U_{30}I_3\cos\varphi_3 \\ Q &= U_{10}I_1\sin\varphi_2 + U_{20}I_2\sin\varphi_2 + U_{30}I_3\sin\varphi_3 \end{aligned}\right\} \qquad (63)$$

în care $U_{10} = |V_1 - V_0|$; $U_{20} = |V_2 - V_0|$; $U_{30} = |V_3 - V_0|$ reprezintă modulele vectorilor tensiunilor punctelor de intersecţie ale curenţilor $I_1I_2I_3$, cu Σ, aceste tensiuni fiind raportate la un acelaşi potenţial de origine V_0 *oricare ar fi el.* I_1, I_2, I_3, reprezintă modulele curenţilor dirijaţi în direcţia *a*, iar

$$\varphi_1 = \widehat{U_{10}I_1} \quad ; \quad \varphi_2 = \widehat{U_{20}I_2} \quad ; \quad \varphi_3 = \widehat{U_{30}I_3}$$

Puterile P şi Q au entităţi independente. Poate una să aibă valoarea finită şi alta nulă sau invers. Poate una să fie pozitivă şi cealaltă negativă. Adică se poate ca puterea activă să *circule* într-un sens şi cea reactivă în *sens invers*.

Puterea reactivă totală, ca urmare a celor arătate la paragraful 11 şi relaţiile (42) şi (43) are semnificaţia (în sensul de circulaţie *a*)

$$Q = \Sigma UI\sin\varphi = 2\omega(W_m - W_e), \qquad (64)$$

în care W_m şi W_e reprezintă valorile medii ale energiilor transmise cîmpurilor magnetice şi electrice de către toate elementele circuitului şi conductorilor din sectorul II, energii procurate din sectorul I prin secţia Σ.

Exprimînd toate aceste proprietăţi sub forma complexă a puterii aparente obţinem

$$\overline{S} = \overline{S}_1 + \overline{S}_2 + \overline{S}_3 = \overline{U}_1\overline{I}_1^* + \overline{U}_2\overline{I}_2^* + \overline{U}_3\overline{I}_3^* = P + jQ = P + j2\omega(W_m - W_e) \qquad (65)$$

Precizăm de asemenea că secţiunea Σ este definită numai prin intersecţia ei cu cele trei fire ale circuitului trifazat, presupus complet (sistem trifazat cu trei fire). Interpretarea se aplică în mod cu totul analog la un sistem trifazat cu patru fire.

VI. DIVERSE GENERALIZĂRI ŞI PRECIZĂRI

16. Descompunerea puterilor instantanee dată prin relaţia (6) corespunde unei situaţii fizice de aparate în paralel, iar aceea prin relaţia (11) corespunde situaţiei de aparate în serie. În cazul general situaţia este mai complicată.

Am văzut că puterile activă şi reactivă se supun separat principiului conservării în mod independent, oricum ar fi construită reţeaua. Puterile instantanee se conservă însă prin *totalul lor*.

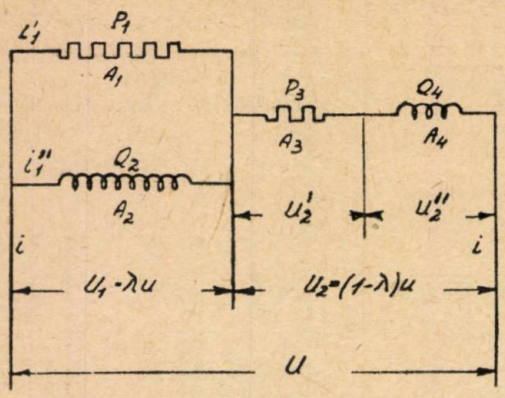


Fig. 6

Este adevărat că prin relaţiile (16) am descompus conservarea puterilor instantanee în două relaţii de conservare de puteri instantanee p' şi p''. Dar expresiile de puteri p' şi p'' nu reprezintă puteri instantanee corespunzînd separat şi exclusiv puterilor active şi reactive, ci reprezintă o descompunere corespunzînd tuturor curenţilor reţelei, pe un sistem de două axe arbitrare.

Un observator de la uzină, din diagrama puterii instantanee la uzină poate să identifice puterile totale aparentă, activă, reactivă (paragraful 6, fig. 3), oricare ar fi constituţia reţelei. El poate face de asemenea o ipoteză arbitrară ca aparatele sînt în serie sau în paralel, de unde deduce puterile activă şi reactivă cu aceleaşi valori.

Ne propunem a arăta acum care este situaţia corelaţiei între puterile activă şi reactivă şi puterile instantanee, în cazul unui montaj mixt oarecare.

S-a arătat deja că un astfel de sistem este echivalent cu un dispozitiv de 4 aparate, dintre care două, A_1 şi A_2 montate în paralel, consumă o putere activă P_1 şi o putere reactivă Q_2, iar alte două A_3 şi A_4 montate în serie consumă primul o putere activă P_3 şi celălalt o putere reactivă Q_4 (fig. 6), în care $P_1/P_3 = Q_2/Q_4$.

Tensiunea instantanee alimentînd întreg sistemul este notată cu u, iar curentul total cu i. Repartiţia tensiunii între cele două grupe de aparate este, în cazul cel mai general, exprimat prin relaţia

$$u = u_1 + u_2 = \lambda u + (1 - \lambda)\, u, \tag{66}$$

în care λ reprezintă un factor oarecare necunoscut şi care depinde de constituţia reţelei. $\lambda = 1$ corespunde la aparate montate în paralel şi $\lambda = 0$ la aparate montate în serie. Pentru $0 < \lambda < 1$ avem un montaj mixt oarecare.

Expresiile tensiunii u şi curentului i sînt identice cu acelea din relaţia (3)

$$u = \sqrt{2}\, U \sin(\omega t + \alpha) \text{ şi } i = \sqrt{2}\, I \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$$

Tensiunile şi curenţii pentru cele patru aparate devin astfel:

$$\left.\begin{aligned}
&\text{Aparat } A_1;\ u_1 = \sqrt{2}\cdot\lambda U \sin(\omega t+\alpha) \text{ şi } i'_1 = \sqrt{2}I\cos\varphi.\sin(\omega t+\alpha)\\
&\text{Aparat } A_2;\ u_1 = \sqrt{2}\lambda U \sin(\omega t+\alpha) \text{ şi } i''_1 = -\sqrt{2}I\sin\varphi\cos(\omega t+\alpha)\\
&\text{Aparat } A_3;\ u'_2 = \sqrt{2}(1-\lambda)\cdot U\cos\varphi.\sin(\omega t+\alpha-\varphi) \text{ şi } i =\\
&\qquad\qquad = \sqrt{2}I\sin(\omega t+\alpha-\varphi)\\
&\text{Aparat } A_4;\ u''_2 = \sqrt{2}(1-\lambda).U\sin\varphi\cdot\cos(\omega t+\alpha-\varphi) \text{ şi } i =\\
&\qquad\qquad = \sqrt{2}\cdot I\sin(\omega t+\alpha-\varphi)
\end{aligned}\right\} \quad (67)$$

Din (67) deducem puterile activă şi reactivă consumate în fiecare dintre cele patru categorii de aparate şi anume:

$$\left.\begin{aligned}
&\text{Aparat } A_1;\ P_1=\lambda UI\cos\varphi;\ Q_1=0\\
&\text{Aparat } A_2;\ P_2=0;\ Q_2=\lambda UI\sin\varphi\\
&\text{Aparat } A_3;\ P_3=(1-\lambda)\,UI\cos\varphi;\ Q_3=0\\
&\text{Aparat } A_4;\ P_4=0;\ Q_4=(1-\lambda)\,UI\sin\varphi.
\end{aligned}\right\} \quad (68)$$

Toate puterile active şi reactive în sistemul (68) constituie o corelaţie cu puterile instantanee

$$p_1 = u\,i'_1\ ;\quad p_2 = u_1\cdot i''_1\ ;\quad p_3 = u'_2\cdot i\ ;\quad p_4 = u''_2\cdot i$$

deduse din (67).

Pe de altă parte, prin aplicarea principiului conservării la sistemul (68) deducem:

$$\left.\begin{aligned}
&P = P_1+P_2+P_3+P_4 = UI\cos\varphi\\
&Q = Q_1+Q_2+Q_3+Q_4 = UI\sin\varphi.
\end{aligned}\right\} \quad (69)$$

Parametrul arbitrar necunoscut λ se elimină. Regăsim astfel puterile activă şi reactivă cu valorile lor totale, prin corelaţia tot cu puterile instantanee, oricare ar fi constituţia reţelei şi deci oricare ar fi λ.

17. Într-un regim trifazat şi în general într-un regim polifazat, cînd vorbim de corelaţia cu puterile instantanee, trebuie să înţelegem că e vorba de corelaţia între puterile activă, respectiv reactivă şi instantanee, considerate pe fiecare fază în parte. Într-adevăr, oscilaţia de energie a energiilor cîmpurilor magnetice şi electrice se manifestă şi produc efectele lor de transport pe fiecare fază. Semnificaţia puterii reactive totale rezultă din principiul conservării, ea fiind egală cu suma puterilor reactive elementare, principiu care, după cum am văzut, are o bază concretă. În sensul acesta s-a convenit internaţional că prin putere reactivă a unui sistem oarecare trebuie să înţelegem suma algebrică a puterilor reactive elementare. În anumite cazuri particulare vom ţine seama de valorile pe fiecare fază în parte, dacă aceasta ne interesează în special, cum ar fi, de exemplu, calculul liniilor într-un regim dezechilibrat.

18. În concordanţă cu cele expuse la paragraful 16, în fenomenul de compensare între o inductanţă şi un condensator montate într-un fel oarecare pe reţea, adică nici în serie, nici în paralel, puterile instantanee ale acestor două aparate nu mai sînt totdeauna în fază sau în opoziţie, totuşi aceste puteri instantanee intră în constituţia puterilor instantanee totale ale reţelei, producînd atît în reţea, cît

şi, în special, la sursă, un fenomen de compensare, *ca şi cum cele două aparate ar fi în serie, ori în paralel.*

Astfel, fie o reţea oarecare alimentată la sursă de o tensiune $u = \sqrt{2}\,U \sin(\omega t + \alpha)$ reţeaua fiind presupusă monofazată pentru precizarea ideilor şi simplificarea expunerii.

Notăm, în cele ce urmează cu

$R_1, R_2 \ldots R_n$ diferite rezistenţe ale reţelei
$L_1, L_2 \ldots L_n$ diferite inductanţe ale reţelei
$C_1, C_2 \ldots C_n$ diferite capacităţi ale reţelei
$i'_1, i'_2 \ldots i'_n$ curenţi străbătînd rezistenţele şi avînd valori eficace $I'_1; I'_2; I'_n$
$i''_1, i''_2 \ldots i''_n$ curenţi străbătînd inductanţele şi avînd valori eficace $I''_1; I''_2; I''_n$
$u_1, u_2 \ldots u_n$ tensiunile aplicate capacităţilor şi avînd valorile eficace $U_1; U_2; U_n$
U, I, φ tensiunea, curentul şi defazajul la sursă.

Energia instantanee pe care sursa o furnizează este $w = w' + w''$ în care:

$$w' = \int \Sigma R_n (i'_n)^2\, dt \quad ; \quad w'' = \Sigma \frac{1}{2} L_n (i''_n)^2 + \Sigma \frac{1}{2} C_n (u_n^2).$$

Puterile instantanee la sursă au deci forma generală

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw'}{dt} + \frac{dw''}{dt} = p' + p''.$$

Oricare ar fi însă constituţia reţelei, cei doi termeni p' şi p'' au *la sursă* expresiile

$$\left.\begin{aligned} p' &= \Sigma R_n (I'_n)^2 \cdot [1 - \cos 2(\omega t + \alpha)] = UI \cos\varphi\, [1 - \cos 2(\omega t + \alpha)] \\ p'' &= 2\omega \left[\Sigma \frac{1}{2} L_n (I''_n)^2 - \Sigma \frac{1}{2} C_n U_n^2\right] \cos 2\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{4}\right) = \\ &= UI \sin\varphi \cos 2\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{4}\right) \end{aligned}\right\} \quad (70)$$

Regăsim astfel la sursă, *oricare ar fi constituţia reţelei*

$$\left.\begin{aligned} P &= \Sigma R_n (I'_n)^2 = UI \cos\varphi\,; \quad Q = 2\omega (W_m - W_e) = UI \sin\varphi \end{aligned}\right\} \quad (71)$$

în care:

$$W_m = \Sigma \frac{1}{2} L_n (I''_n)^2 \quad \text{şi} \quad W_e = \Sigma \frac{1}{2} C_n U_n^2$$

19. La paragraful 12 am studiat fenomenul de compensare prin intermediul energiilor W_m şi W_e ale cîmpurilor magnetice şi electrice. Este cazul unui condensator care compensează puterea reactivă a unei inductanţe.

În realitate, însă, ceea ce produce fenomenul de compensare nu este propriu-zis energia W_e, ci puterile instantanee provocate de deplasarea acestei energii.

Însă noi putem realiza astfel de puteri instantanee fără a fi produs deplasarea unei energii electrice intrinsece W_e, ci pe alte căi diferite, care ne conduc tot la un fenomen de compensare.

Este cazul, de exemplu, al motorului sincron supraexcitat.

În adevăr, din compararea relaţiilor (52) şi (54) de mai sus, se vede că puterile instantanee dezvoltate de un condensator şi un motor sincron supraexcitat, sînt de aceeaşi formă, cînd cele două categorii de aparate ar fi situate în acelaşi punct al reţelei. Ambele produc un efect de compensare, deşi unul funcţionează pe baza unei energii electromagnetice W_m şi altul pe baza unei energii electrostatice W_e.

În expresia generală a puterii-reactive

$$Q = 2\omega (W_m - W_e)$$

efectul de compensare al motorului sincron supraexcitat este produs prin reducerea energiei magnetizante W_m pe care ar trebui s-o producă sursa, iar efectul de compensare al condensatorului este produs prin majorarea energiei cîmpurilor electrice, care se vede că figurează cu semnul minus în expresia puterii reactive totale.

De asemenea vom vedea la capitolul VII şi posibilităţi de compensare prin metode electromecanice.

20. În paragrafele anterioare am studiat fenomenele într-un sistem energetic, presupunînd că elementele constructive ale reţelei sînt formate din rezistenţe, inductanţe şi capacităţi *constante*, sau aparate echivalente cu acestea.

În generalitatea cazurilor, aceşti parametri ai reţelelor nu mai au valori constante. Această situaţie este examinată în electrotehnică prin prizma mai multor concepţii, pe care le relevăm în cele ce urmează:

a) Cînd parametrii R, L, C nu sînt constanţi, ecuaţiile reţelelor constituie sisteme neliniare, spre diferenţă de cazul cu parametrii constanţi, care ne conduc la sisteme liniare.

Situaţia sistemelor neliniare este studiată prin unele metode speciale de calcule şi de investigaţii în general.

O astfel de situaţie introduce oarecare amenajări şi adaptări în calculele noastre, fără însă a infirma principiile mai sus expuse, care stau la baza fenomenelor reactive.

b) Sînt situaţii particulare cînd diversele valori ale lui R, L sau C au în total sau în parte variaţii continui între anumite limite, în intervale de timp de obicei scurte.

Aceste cazuri echivalează, în majoritatea împrejurărilor, cu aşa-zisele *fenomene tranzitorii*, care introduc în reţea efecte, care se pot determina prin diverse metode de calcul cunoscute. Un exemplu este cazul modificării valorii unei rezistenţe prin încălzirea ei, a stabilirii unui curent sau tensiuni etc.

Astfel de situaţii pot provoca şi asupra valorii puterilor reactive variaţii, de asemenea cu un caracter tranzitor, fără a infirma principiile de bază.

Intervalele de timp ale fenomenelor tranzitorii de natură mecanică sau calorică pot corespunde la intervale de timp mai mari decît acelea ale fenomenelor tranzitorii electrice propriu-zise.

c) Sînt, în sfîrşit, situaţii cînd R, L sau C au variaţii periodice regulate. În aceste cazuri se introduc în reţea manifestări ale unui nou fenomen, distinct de fenomenul reactiv, şi anume *fenomenul deformant*.

Acest fenomen îşi are proprietăţile lui, are corelaţii speciale cu anumite proprietăţi fizice, şi în general, cu valorile instantanee de tensiuni, curenţi, puteri. Acest fenomen introduce mărimi noi (puteri deformante etc.). De exemplu, este cazul unor inductanţe cu fier saturat, a supapelor electronice etc.

În general, orice aparate echivalente cu o rezistenţă, inductanţă sau capacitate periodic variabile constituie aparate deformante.

Manifestările deformante depăşesc cadrul prezentului studiu.

d) Dispozitivele cu contacte alunecătoare echivalează cu situaţiile cînd R,L,C sînt variabile aşa cum s-a menţionat mai sus.

21. După cum am avut ocazia de a arăta deja şi în regim deformant, puterea reactivă se poate pune sub o formă analogă cu aceea din regimul sinusoidal, şi anume

$$Q = \Sigma U_n I_n \sin \varphi_n = 2\omega' (W_m - W_e) \tag{72}$$

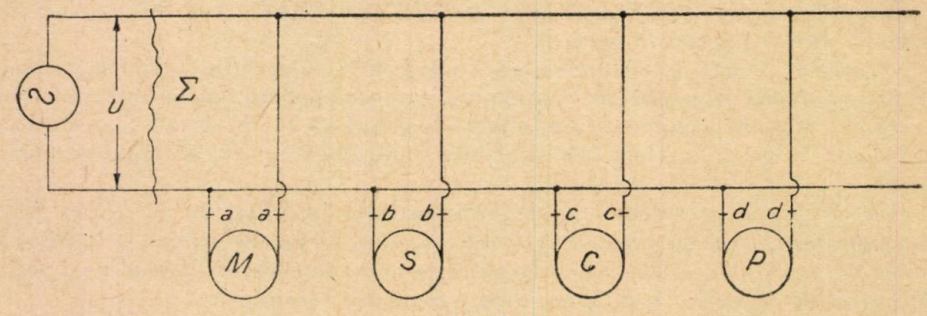
în care W_m şi W_e au aceleaşi semnificaţii ca în cazul regimului sinusoidal, iar $2\omega'$ este *media ponderată* a pulsaţiilor de oscilaţie a energiilor intrinsece pe diferitele unde ale regimului nesinusoidal respectiv.

VII. FENOMENELE REACTIVE ELECTROMECANICE

22. Să considerăm o reţea la care sînt racordate patru categorii de aparate caracterizate prin condiţiile de funcţionare mai jos indicate (fig. 7). Pentru precizarea raţionamentului reducem reţeaua la o linie monofazată deservind patru aparate distincte, şi anume un aparat electromagnetic M, un aparat electrostatic S, un aparat electrocinetic C şi unul electro-elastic P. Tensiunea liniei de alimentare este sinusoidală, avînd expresia

$$u = \sqrt{2}U \cdot \sin(\omega t + \alpha).$$

Pe consideraţia principiului de conservare a energiei şi deci a puterilor instantanee, manifestările energetice ale acestor aparate pot fi examinate separat, chiar



F g. 7

dacă în realitate funcţionarea lor este coexistentă prin suprapunerea a două sau mai multe categorii dintre ele.

Aparatele electromagnetice M şi electrostatic S sînt de tipul acelora indicate la paragraful 12. Regimul lor de funcţionare energetică concordă cu acela indicat la paragraful 12.

În cele ce urmează ne vom ocupa de funcţionarea aparatelor electrocinetice şi electro-elastice.

23. Fie un sistem mecanic oscilant care fiind cuplat cu reţeaua pe o cale electromecanică, manifestările sale energetice interne sînt în corelaţie directă cu schimbul de energie externă la bornele sale electrice C, pe baza principiului conservării energiei. Oscilaţia mecanică a sistemului este în rezonanţă cu pulsaţia electrică a reţelei.

Pentru precizarea ideilor, considerăm sistemul mecanic format dintr-o masă m în oscilaţie liniară sinusoidală cu pulsaţia ω. În concordanţă cu condiţiile energetice indicate, puterea instantanee *furnizată* de reţea la bornele p este în permanenţă egală cu puterea instantanee *primită* de aparatul electrocinetic C. Ne vom folosi de metodele calculului mărimilor complexe extins la întreg domeniul electromecanic.

Notăm valorile analitică şi complexă ale vitezei instantanee oscilante a masei m prin

$$v = \sqrt{2}\, V_e \sin(\omega t + \varepsilon) \quad \text{şi} \quad \bar{v} = v_e(\cos\varepsilon + j\sin\varepsilon) \tag{73}$$

în care v reprezintă valoarea instantanee a vitezei, v_e valoarea sa eficace, $\bar{v}$ valoarea sa complexă şi ε parametrul depinzînd de originea de timp.

Atît energia elementară, cît şi puterea instantanee mecanică dezvoltate sînt exprimate prin relaţia

$$\left.\begin{aligned} dw &= f_1 \cdot v \cdot dt + d\left(\frac{1}{2}\, m v^2\right) \\ p &= \frac{dw}{dt} = f_1 \cdot v + f_2 \cdot v \end{aligned}\right\} \tag{74}$$

f_1 este o forţă în fază cu v (valoarea instantanee a vitezei), necesară spre a învinge consumaţiile mecanice interne (frecări etc.), avînd valoarea eficace f_e; $f_2 = m\dfrac{dv}{dt}$ reprezintă forţa dezvoltată prin variaţia vitezei v a masei m.

Formele complexe ale celor două forţe sînt

$$\left.\begin{aligned} \bar{f}_1 &= f_e\,(\cos\varepsilon + j\sin\varepsilon). \\ \bar{f}_2 &= jm\omega \cdot v_e(\cos\varepsilon + j\sin\varepsilon) = m\omega \cdot v_e(-\sin\varepsilon + j\cos\varepsilon) \end{aligned}\right\} \tag{75}$$

Puterea totală complexă mecanică o deducem înmulţind forţele cu valorile conjugate de v, deoarece v reprezintă factorul fizic de natură cinetică, în componenţa puterii complexe, analog cu I din electrotehnică. De altfel aici nu este vorba de o simplă analogie, deoarece prin lucrările lui Faraday şi ale academicianului V. Mitchevici, confirmate prin teoria electronică, curentul electric este în mod fizic un fenomen cinetic.

În consecinţă, puterea complexă absorbită de sistemul mecanic devine $\bar{S}_m = \bar{f}_1 \cdot v^* + \bar{f}_2 \cdot v^*$ şi ţinînd seama de expresiile $\bar{f}_1$ şi $\bar{f}_2$ din relaţia (75) şi $v^* = v_e(\cos\varepsilon - j\sin\varepsilon)$ din relaţia (73) obţinem

$$\bar{S}_m = f_e\, v_e + jm\omega v_e^2 = f_e v_e + j2\omega W_c \tag{76}$$

în care W_c este energia cinetică medie a sistemului mecanic, iar $f_e v_e = P$ reprezintă puterea activă mecanică medie absorbită.

În consecinţă, sistemul electrocinetic pur absoarbe o putere instantanee p (relaţia 74) care ne conduce la o putere aparentă complexă sub forma mecanică

$$\bar{S}_m = P + j2\omega W_c \tag{77}$$

În această expresie de putere complexă mecanică, P reprezintă o putere reală, şi deci de aceeaşi natură fizică cu puterea reală dintr-o putere complexă electrică

W_e reprezintă energia medie cinetică a sistemului mecanic, care intervine aici în mod analog cu energia medie magnetică W_m dintr-un aparat electromagnetic.

Constatăm deci că sistemul mecanic, spre a efectua mişcarea sa oscilatorie, absoarbe o putere activă mecanică P, o putere reactivă mecanică $2\omega W_e$ şi o putere complexă mecanică $\overline{S}_m$ (relaţia 77). Puterea instantanee p absorbită sub forma electrică, pe baza principiului conservării, este aceeaşi. Celelalte elemente ale puterii absorbite sub formă electrică (reactivă, aparentă), pot fi influenţate de parametrul de defazaj ε al vitezei v (relaţia 73) şi care poate să depindă de modul de realizare a cuplajului electromecanic.

Dacă e vorba de un sistem mecanic cu mişcare oscilantă rotativă, rezultatul din (76) şi (77) rămîne acelaşi. În acest caz înlocuim în raţionament masa prin momentul polar de inerţie, viteza liniară prin viteza unghiulară şi forţa prin cuplu mecanic.

Precizăm că atunci cînd e vorba de o energie cinetică sub viteză uniformă, nu mai apare fenomenul de putere reactivă de natură mecanică, deoarece fenomenul oscilant nu există. Este cazul tuturor maşinilor electrice învîrtitoare cu viteză uniformă.

24. Fie tot un sistem mecanic oscilant, practic lipsit de o masă sau de un moment polar de inerţie, dar a cărui mişcare oscilantă este întreţinută de un sistem de resoarte elastice. Acest aparat electroelastic P este de asemenea legat la o reţea pe o cale electromecanică, astfel că manifestările sale energetice interne să fie dictate de schimbul de energie externă la bornele sale electrice d. Oscilaţia mecanică este de asemenea în rezonanţă cu pulsaţia reţelei, şi deci puterea instantanee *furnizată* de reţea la bornele d este în permanenţă egală cu puterea instantanee *primită* de aparat.

Expresiile analitică şi complexă ale vitezei instantanee sînt aceleaşi ca şi în cazul aparatului electrocinetic (relaţii 73) şi cu aceleaşi semnificaţii.

Atît energia elementară, cît şi puterea instantanee mecanică dezvoltate în acest sistem sînt de data aceasta

$$\left.\begin{aligned} dw &= f_1 v\, dt + d\left[\frac{1}{2}\,\frac{1}{c}\,\lambda^2\right] \\ p &= \frac{dw}{dt} = f_1 \cdot v + f_2 v \end{aligned}\right\} \tag{78}$$

în care f_1 are aceeaşi semnificaţie ca în relaţiile (74).

$f_2 = \dfrac{1}{C}\,\lambda$ reprezintă forţa dezvoltată asupra sistemului elastic.

λ reprezintă lungirea instantanee periodic oscilantă a sistemului elastic, iar C un factor fizic, analog capacităţii unui condensator, corespunzînd caracteristicii elastice a sistemului. Expresia lui C este variabilă după forma şi dimensiunile sistemului elastic. C este admis constant, sistemul funcţionînd în limita de elasticitate.

Expresiile analitice instantanee şi complexă a lungirii λ intrînd în componenţa forţei f_2 devin astfel

$$\left.\begin{aligned} \lambda &= \int v\,dt = -\sqrt{2}\,\frac{v_e}{\omega}\cos(\omega t + \varepsilon) \\ \bar{\lambda} &= -j\,\frac{v_e}{\omega}\,(\cos\varepsilon + j\sin\varepsilon) = \frac{v_e}{\omega}\cdot(\sin\varepsilon - j\cos\varepsilon) \end{aligned}\right\} \tag{79}$$

iar formele complexe ale acestor două forţe $\bar{f}_1$ şi $\bar{f}_2$

$$\left.\begin{aligned} \bar{f}_1 &= f_e(\cos\varepsilon + j\sin\varepsilon) \\ \bar{f}_2 &= \frac{1}{C}\bar{\lambda} = \frac{1}{C}\cdot\frac{\varphi_e}{\omega}(\sin\varepsilon - j\cos\varepsilon) \end{aligned}\right\} \tag{80}$$

În consecinţă, puterea mecanică complexă, ca şi în cazul aparatului electrocinetic, devine $\bar{S}_m = \bar{f}_1\varphi^* + \bar{f}_2\varphi^*$ şi ţinînd seama de expresiile f_1 şi f_2 din relaţia (80) şi $\varphi^* = (\cos\varepsilon - j\sin\varepsilon)\,V_e$ din relaţia (73) obţinem

$$\bar{S}_m = f_e\varphi_e - j\frac{\varphi_e^2}{c\omega} = f_e\varphi_e - j2\omega W_p \tag{81}$$

în care $W_p = \dfrac{\varphi^2_e}{2C\omega^2}$ reprezintă energia elastică sau potenţială medie, înmagazinată în sistemul elastic oscilant, iar $f_e\varphi_e = P$ reprezintă, ca şi în cazul aparatului electrocinetic, puterea activă mecanică medie absorbită.

Făcînd consideraţii identice, ca în cazul aparatului electrocinetic, sistemul electroelastic absoarbe sub formă mecanică o putere complexă, care dedusă din relaţia (81) are expresia

$$\bar{S}_m = P - j2\omega W_p \tag{82}$$

Sistemul electroelastic absoarbe deci o putere activă mecanică $P = f_e\varphi_e$, o putere reactivă mecanică $-2\omega W_p$ şi deci o putere aparentă complexă mecanică $\bar{S}_m$. Relaţia (82) este cu totul analogă cu puterea complexă absorbită de un aparat electrostatic (relaţia 55.)

Suprapunerea, sub o formă oarecare, a unui aparat electrocinetic cu unul electroelastic, conduce la compensarea puterilor reactive mecanice respective, ele fiind de semn diferit.

În ceea ce priveşte regimul de puteri absorbite sub formă electrică de la reţea, sînt valabile aceleaşi constatări ca în cazul aparatului electrocinetic.

25. În practică, dintre cele patru categorii de aparate M, S, C, P unele pot exista izolat, ca de exemplu o inductanţă sau un condensator. În alte situaţii, condiţiile lor de funcţionare impun o coexistenţă prin suprapunerea lor. Astfel o linie electrică avînd şi inductanţă şi capacitate este echivalentă cu o suprapunere $M + S$. Maşini cu mişcare şi curent alternativ pot fi echivalente cu un sistem $M + C + P$, sau numai cu $M + C$, dacă sistemul electroelastic P ar avea un efect neglijabil.

În aceste condiţii, pe baza principiului de conservare algebrică a puterilor active şi reactive, sau de conservare vectorială a puterii aparente într-o reţea electrică, ceea ce se aplică în cazul de faţă, putem scrie imediat puterea complexă totală a oricărei combinaţii de aparate suprapuse, ca fiind suma puterilor complexe ale aparatelor elementare intrînd în componenţa sistemului total.

În particular, putem scrie că puterea complexă totală transmisă de reţea tuturor celor patru aparate (fig. 7) are forma

$$\bar{S}_t = P_t + j[2\omega(W_m - W_e) + Q_c + Q_p] \tag{83}$$

în care P_t reprezintă suma totală algebrică a puterilor active *transmise* fiecăruia dintre cele patru aparate; W_m şi W_e reprezintă valorile medii de energie transmise

de rețea cîmpurilor magnetice și electrice, iar Q_e și Q_p sînt expresiile algebrice ale puterilor reactive absorbite de aparatele electromecanice, de la rețea, sub formă electrică.

26. Un dispozitiv compensator electromecanic poate fi realizat conform celor indicate la paragraful 25.

Efectul compensator al unui astfel de dispozitiv poate consista din următoarele fenomene:

În primul rînd, în interiorul însuși al dispozitivului mecanic putem realiza o compensație a puterilor reactive de natură mecanică. Ținînd seama de cele expuse prin relațiile (77) și (82), o astfel de compensație internă mecanică a aceluiași dispozitiv oscilant se poate realiza, dat fiind că puterea aparentă complexă mecanică are expresia

$$\overline{S}_m = P + j\,2\omega\,(W_e - W_p) \tag{84}$$

Energia W_p înmagazinată în sistemul elastic oscilant compensează efectul energiei W_e înmagazinată sub forma cinetică în același sistem mecanic.

Prin natura constituției cuplajului electromecanic între dispozitivul mecanic și cel electric și deci prin condițiile de realizare ale parametrului ε de defazaj al vitezei v (relația 73) față de parametrul α al tensiunii la bornele u, se poate obține ca puterea reactivă, care mai trebuie *absorbită* sub formă electrică, să devină negativă, adică aparatul să devină *producător* de putere reactivă. În realizarea acestei condiții, excitația sistemului electric are rolul său.

Astfel au fost realizate, în anumite condiții constructive, dispozitive mecanice de acest gen, în care se îndeplinește condiția în interiorul sistemului mecanic $\frac{1}{C\omega} > M\omega$, curentul electric absorbit de la rețea fiind defazat în urmă și deci avînd un caracter inductiv; prin majorarea excitației, acest curent absorbit scade, trece prin zero, schimbă de semn devenind, deci, un curent capacitiv, care apoi crește cu creșterea excitației. Se obține astfel un fenomen oarecum analog cu acela al unui motor sincron funcționînd în gol supraexcitat.

În condiția mecanică mai sus indicată, C este factorul fizic, definind condițiile elastice ale sistemului așa cum intervin în relația (80).

$\frac{1}{C}$ poate fi privit ca o *elastanță mecanică*. M este masa sistemului mecanic oscilant. S-au realizat și alte variante de astfel de sisteme compensatoare electromecanice.

Această problemă constituie încă un domeniu de cercetări.

CONCLUZII

Fenomenele reactive au corelații cu diverse manifestări fizice și în special cu: puterile instantanee, proprietatea de conservare, aspectul energetic, diverse și multiple manifestări tehnice etc.

Fenomenele reactive prin aceste corelații au un aspect fizic. Puterea reactivă, la rîndul său, este o mărime, care are calitatea de a caracteriza acest aspect fizic al fenomenelor reactive.

Cunoașterea cît mai aprofundată a acestei situații este necesară. De altfel această problemă desigur că nu este încă epuizată. Multiplele manifestări tehnice

în exploatările industriale ale fenomenelor reactive, implică permanente preocupări de compensare a acestor fenomene, a căror realizare trebuie să se bazeze tocmai pe situaţiile fizice care stau la baza lor.

Problema are o importanţă deosebită la noi în ţară, dat fiind, în special, că opera de electrificare a intrat în faza de realizare.

Este pus în evidenţă rolul energetic al mărimii $(T - U)_{med}$, care în cazul particular electromagnetic se reduce la $W_m - W_e$. Această semnificaţie ne explică fenomenul fizic de compensare şi ne îndrumează în realizarea dispozitivelor de compensare.

Dispozitivele de compensare electromecanică, teoretic, sînt posibile şi confirmate experimental. Din consideraţii constructive şi economice, însă, ele nu au intrat încă în domeniul utilizărilor curente. Teoria ne poate însă îndruma în această direcţie. Metodele de calcul ale mărimilor complexe se pot extinde în mod unitar şi în domeniul fenomenelor de oscilaţie electromecanică.

Se pot identifica în interiorul fenomenelor oscilante mecanice, mărimi echivalente cu puteri active, reactive, aparente complexe. În interiorul fenomenelor mecanice masa joacă rolul inductanţei din fenomenele electrice, iar factorul de elasticitate mecanică definit prin raportul dintre forţa elastică şi lungirea elastică joacă rolul elastanţei electrice. Corelaţia între puterea reactivă mecanică şi aceea electrică poate fi influenţată de condiţiile de cuplaj electromecanic, caracterizate prin corelaţia între parametrii de defazaj electrici şi mecanici.

O atenţie deosebită se impune asupra concluziilor privitoare la condiţiile de compensare, faţă de montaje echivalente în serie, derivaţie sau mixte. Astfel, de exemplu, două dispozitive echivalente cu inductanţe montate în serie sub o tensiune constantă reduc consumul de putere reactivă, dar aceasta nu constituie un fenomen de compensare. O capacitate montată în paralel cu o inductanţă, tot sub o tensiune constantă reduce de asemenea consumul de putere reactivă, însă de data aceasta printr-un efect fizic de compensare. Principiul de conservare a puterilor se aplică însă în orice fel de montaje, pentru situaţia corespunzătoare respectivă.

ОБЩАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ РЕАКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Не входя в рассмотрение реактивной мощности с двух крайних точек зрения физической величины и расчетной величины, автор исследует соотношение реактивных явлений и различных видов реально существующих физических представлений, характеризуемых понятием реактивной мощности.

Выявляется, таким образом, связь между реактивными явлениями и различными физическими проявлениями — мгновенными мощностями, способностью сохранения, энергетической картиной, а также многочисленными техническими проявлениями.

Способность сохранения реактивной мощности как в сети, так и в явлении переноса доказывается при посредстве мгновенных мощностей. Реактивным явлениям эти соотношения придают физический облик, могущий быть охарактеризован реактивной мощностью.

Углубление познания этих многочисленных физических проявлений необходимо для изучения и разрешения различных вопросов, возникающих в практике при появлении реактивных явлений. Вопрос этот имеет особо важное значение в стране, в особенности в настоящее время, когда проводится электрификация.

Выявляется роль, принадлежащая с энергетической точки зрения величине $(T - U)_{med}$, способной распространять и углубять физическое значение реактивных явлений.

Рассматриваются с теоретической точки зрения условия электромеханического компенсирования, подтвержденные экспериментальным путем. По конструктивным и экономическим соображениям соответствующие устройства еще не вошли в область обычного применения, находясь в стадии исследований с этой точки зрения.

Изучение реактивных явлений представляет таким образом актуальное значение как в научной области, так и в области текущего практического применения.

ASPECT GÉNÉRAL PHYSIQUE DES PHÉNOMÈNES RÉACTIFS, ÉLECTRIQUES ET ÉLECTROMÉCANIQUES

(RÉSUMÉ)

Sans considérer la puissance réactive sous les aspects extrêmes de grandeur physique ou grandeur de calcul, l'Auteur examine quelle est la corrélation existant entre les phénomènes réactifs et les divers aspects des réalités physiques, caractérisés par la notion de puissance réactive.

On met ainsi en évidence le rapport entre les phénomènes réactifs et les différentes manifestations physiques, dont: les puissances instantanées, la propriété de conservation, l'aspect énergétique, ainsi que de multiples manifestations techniques.

La propriété de conservation de la puissance réactive, aussi bien dans un réseau que dans un phénomène de transfert, est démontrée par l'entremise des puissances instantanées. Ces corrélations impriment un aspect physique aux phénomènes réactifs, pouvant être caractérisés par la puissance réactive.

L'examen à fond de ces multiples manifestations physiques s'impose lorsqu'il s'agit d'étudier et de résoudre les divers problèmes que pose, dans la pratique, l'apparition des phénomènes réactifs. Le problème a une importance tout particulière dans notre pays, surtout à l'époque actuelle où l'électrification est en cours de réalisation.

On fait ressortir le rôle énergétique de la grandeur $(T - U)$ moyenne, à même d'étendre et d'approfondir la signification physique des phénomènes réactifs.

On examine théoriquement les conditions de compensation électromécanique, confirmées expérimentalement. Cependant, pour des raisons de construction et d'économie, de pareils dispositifs faisant encore l'objet des recherches ne sont pas encore d'usage courant.

L'étude des phénomènes réactifs est donc d'une brûlante actualité, aussi bien dans le domaine purement scientifique, que dans celui des applications courantes.

BIBLIOGRAFIE

1. Angot A., *Compléments de mathématiques.* Paris, 1949.
2. Antoniu I., Comunicările Acad. R.P.R., t. I, nr. 7, 1951, p. 611.
3. Becker R., *Theorie der Elektrizität.* Leipzig—Berlin, 1953.
4. Boucherot P., *Suiets spéciaux relatifs aux fonctionnements des machines et appareils à courants alternatifs.* Curs, 1924 — 1925, ediţia poligrafiată.
5. Budeanu C., *Quelques considérations sur le rôle physique des puissances instantanées dans un système d'énergie électrique.* Buletinul Şcoalei politehnice, anul I, 1929, nr. 1.
6. — *Conférence des Grands Réseaux électriques.* 1929.
7. — *Conference des Grands Réseaux électriques.* 1931.
8. — Electricitatea, 1951, nr. 2 şi 3.
9. Krug C. A., *Osnovi electrotehniki.* Leningrad, 1952, p. 101, 191—192, 376.
10. Marinescu M., Bul. Ştiinţ. Acad. R.P.R., Secţiunea de ştiinţe tehnice şi chimice, t. IV, nr. 3—4, iulie—decembrie 1952, p. 249.
11. Mitehevici V., *Magnitnîi potok i ego preobrazovania.* Izd. Akad. Nauk SSSR, Moscova—Leningrad, 1946.
12. Teleşev B. A., Neobhodimoe utocinenie terminologii v voprose izmerenia reactivnoi moşnosti. Electriceştvo, nr. 11, 1952.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul IV, 1954

ELECTROENERGETICĂ

MĂSURAREA PUTERII ŞI ENERGIEI REACTIVE

DE

ION S. ANTONIU

I. GENERALITĂŢI

O mărime poate fi trecută în domeniul ştiinţelor fizico-matematice numai atunci cînd poate fi măsurată. Numai în acest caz ea poate fi introdusă în ecuaţii şi formule, asupra cărora să se poată aplica toate metodele de raţionament şi investigaţii specifice ştiinţelor fizico-matematice.

Măsurarea mărimilor alternative, cu ajutorul metodelor şi aparatelor de măsură de care dispune tehnica pînă acum, se bazează pe valoarea medie, simplă sau pătratică, pe care o are o asemenea mărime într-un anumit timp, de obicei în timpul unei perioade.

Puterea reactivă nu prezintă în general o asemenea valoare medie concepţia de mărime instantanee reactivă fiind în curs de studiu. Într-adevăr mărimea

$$Q = \pm UI \sin \varphi \tag{1}$$

care reprezintă puterea reactivă dintr-un circuit avînd la bornele sale tensiunea

$$u = U\sqrt{2} \sin \omega t \tag{2}$$

şi străbătut de curentul

$$i = I\sqrt{2} \sin (\omega t + \varphi), \tag{3}$$

nu reprezintă altceva decît schimbul de energii electrice şi magnetice dintre elementul considerat şi restul reţelei, energii care nu se transformă într-o altă formă.

Măsurarea mărimii exprimată prin relaţia (1) a prezentat şi prezintă încă o dificultate şi aceasta a fost una din cauzele care au făcut ca punerea la punct a problemei prezenţei puterii reactive în reţelele electrice să întîrzie foarte mult, în raport cu celelalte probleme puse de transmiterea şi distribuirea energiei electrice în curent alternativ.

Tot din această cauză, însăşi definirea puterii reactive este şi astăzi încă discutată, mai ales în regimul deformant.

Tehnica cere, pentru măsurarea mărimilor pe care le foloseşte, aparate de măsură, care să poată fi uşor construite şi utilizate, care să aibă o răspîndire cît mai mare. Tehnicienii s-au străduit să construiască asemenea aparate, varmetre sau varorămetre, folosind anumite proprietăţi de definiţie a puterii reactive.

Puterea reactivă are un caracter fizic bine definit astăzi, ale cărei proprietăţi sînt cunoscute, care produce nenumărate prejudicii instalaţiilor de producere, transport, distribuţie şi utilizare a energiei electrice, dar fără care nu există posibilitate de funcţionare a motoarelor asincrone, a liniilor electrice de transmitere a energiei electrice şi a transformatoarelor.

Măsurarea puterii reactive interesează deci atît din punct de vedere teoretic, pentru precizarea acestei noţiuni, cît şi din punct de vedere practic, la constatarea puterilor reactive într-o reţea, la redistribuirea lor pentru menţinerea tensiunii constante, la tarifarea energiei reactive etc.

Metodele de măsurare ale puterii reactive şi aparatura corespunzătoare sînt diferite, după cum sistemul energetic este monofazat sau polifazat, regimul de funcţionare sinusoidal sau deformant, simetric şi echilibrat sau nu. În consecinţă, chestiunea măsurării puterii reactive trebuie examinată sub toate aceste aspecte. Trebuie precizat de la început că tehnica nu a rezolvat încă complet toate aceste aspecte şi că deci, în această privinţă, mai este încă mult de făcut.

II. SISTEMUL MONOFAZAT

A. Regimul sinusoidal

1. **Măsurarea puterii reactive.** Expresia puterii reactive

$$Q = \pm UI \sin \varphi, \tag{4}$$

poate fi scrisă

$$Q = \pm UI \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \tag{5}$$

care arată că puterea reactivă poate fi măsurată cu un wattmetru electrodinamic obişnuit, cu condiţia ca, curentul ce străbate bobina voltmetrică a aparatului, şi care este proporţional cu tensiunea aplicată circuitului, să fie decalată cu 90° în *urma* acestei tensiuni, în cazul încărcărilor inductive (*înainte*, în cazul încărcărilor capacitive). Acelaşi lucru s-ar obţine dacă s-ar păstra curentul din bobina voltmetrică în fază cu tensiunea aplicată aparatului şi s-ar decala curentul din bobina ampermetrică, faţă de curentul din circuit, *înainte* respectiv în *urmă*. Ţinînd seama că este mai uşor a se decala curentul din bobina voltmetrică, al doilea procedeu nu este în general utilizat.

Un aparat electrodinamic, la care curentul din bobina voltmetrică este decalat cu 90° faţă de tensiunea aplicată este un *varmetru electrodinamic*. Funcţionarea lui se bazează pe măsurarea unei valori medii, dată de relaţia

$$Q = \frac{1}{T}\int_0^T u' i dt, \tag{6}$$

în care

$$u' = U\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \tag{7}$$

i corespunzînd expresiei (3). Relaţia (6) exprimă chiar, puterea reactivă din circuit [1].

Construcţia unui varmetru electrodinamic este mult mai dificilă decît construcţia unui wattmetru electrodinamic din cauza elementului voltmetric. În principiu, decalajul necesar de 90°, între curentul din bobina voltmetrică şi tensiunea aplicată, se obţine dacă bobina respectivă este foarte inductivă (rezistenţa sa neglijabilă faţă de inductanţă) sau, dacă se leagă în serie cu această bobină un condensator. În aceste cazuri, curentul care străbate bobina de tensiune a varmetrului este

$$\overline{I}_L = -j\frac{U}{L\omega} \text{ respectiv } \overline{I}_C = jC\omega U.$$

Din aceste relaţii se vede că, în cazul ideal se obţine pentru curentul din bobina de tensiune decalajul dorit de 90°, însă aparatul obţinut este influenţat de frecvenţa reţelei. Acest aparat va da indicaţii exacte numai pentru frecvenţa pentru care a fost etalonat.

În afară de frecvenţă, aceste aparate sînt influenţate şi de temperatură, astfel că, faţă de alte aparate de măsură, varmetrele sînt susceptibile de o dublă cauză de erori.

Pentru a obţine aparate neinfluenţate de frecvenţă şi temperatură se foloseşte, pentru bobina de tensiune, sau de curent, montaje speciale. Aceste montaje speciale pot fi reprezentate prin dipoli, tripoli sau cuadripoli, caracterizaţi prin raportul de transformare ξ şi unghiul de decalaj φ dintre mărimea de la ieşire şi aceea de la intrare; ξ poate reprezenta o impedanţă sau o admitanţă aparentă. Diversele influenţe, ca variaţia frecvenţei sau a temperaturii, au ca consecinţă producerea unor abateri asupra mărimilor caracteristice ξ şi φ. Fie $\Delta\xi$ şi δ aceste abateri, care să reprezinte chiar eroarea de măsură a montajului; $\Delta\xi$ este deci o eroare relativă fără dimensii şi valoarea ei este dedusă în raport cu componenta complexă a mărimii ξ singura care interesează în cazul montajelor pentru varmetre.

Dacă ω este frecvenţa utilizării şi ω_0 frecvenţa nominală pentru care a fost construit varmetrul, notînd $\eta = \omega : \omega_0$, atunci abaterea datorită frecvenţei va fi dată de relaţia $\varepsilon = \eta - 1$. După cum η sau ε este mai mic, montajul respectiv este considerat mai puţin dependent sau influenţat de frecvenţă.

Aplicînd aceste notaţii la cazul unei inductanţe pure, sau a unei capacităţi, se găseşte că influenţa frecvenţei este $\Delta\xi = \pm\varepsilon$ după cum montajul este inductiv sau capacitiv *). O variaţie de 0,1 Hz care nu poate fi măsurată nici cu cele mai precise frecventmetre industriale, produce în varmetru prin variaţia curentului din bobina voltmetrică şi a unghiului de decalaj, o eroare de cel puţin 0,2% din valoarea corespunzătoare normală.

---

*) Într-adevăr se poate scrie de exemplu $\overline{I}_0 = -j\frac{U}{L\omega_0}$ şi $\overline{I}_L = -j\frac{U}{L\omega}$, de unde se obţine succesiv

$$\Delta\xi = \frac{I_{L_0} - I_L}{I_L} = \frac{-\frac{1}{\omega_0} + \frac{1}{\omega}}{-\frac{1}{\omega}} = \frac{\omega}{\omega_0} - 1 = \eta - 1 = +\varepsilon.$$

Un montaj simplu pentru a evita eroarea aceasta datorită variaţiei frecvenţei constă în a construi bobina voltmetrică din două părţi simetrice montate pe acecaşi axă (fig. 1).

Cele două părţi sînt alimentate printr-o inductanţă pură respectiv printr-o capacitate. Montajul este astfel făcut încît acţiunea bobinei să fie produsă de suma celor doi curenţi. Valoarea curentului rezultant este aproximativ (neglijînd rezistenţele circuitului)

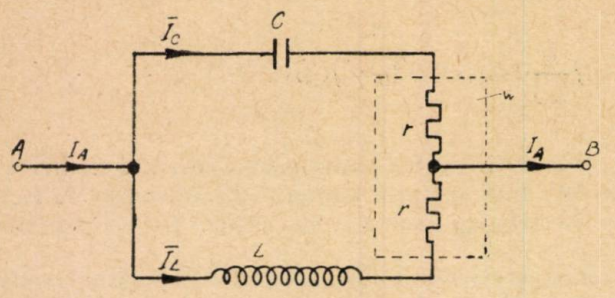


Fig. 1. — Schema de montaj a bobinei mobile a unui varmetru.

$$i = U\left(\omega_0 C + \frac{1}{\omega_0 L}\right)$$

şi este minim în cazul rezonanţei $\omega_0^2\, LC = 1$.

În aceste condiţii, dacă

$$\bar{I}_L + \bar{I}_C = \bar{I}_\Delta$$

şi U_{AB} reprezintă tensiunea aplicată, atunci [2]

$$\xi_j = j\sqrt{\frac{C}{L}}\left(\eta + \frac{1}{\eta}\right)$$

şi

$$\Delta\xi \cong 0{,}5\varepsilon^2;$$

dacă $r\omega C \ll 1$ atunci $\Delta\xi \ll 1$ şi $\delta = 0$.

De exemplu, dacă [3] $L = 5{,}08$ H şi $C = 2$ μF, atunci se obţin valorile arătate în tabloul nr. 1.

Tabloul nr. 1

Hz	ω	$\frac{i}{U} = S$
45	282	1264.10^{-6}
50	314	1256.10^{-6}
55	345	1260.10^{-6}

Rezultă din tabloul nr. 1 că la o variaţie a frecvenţei cu $\pm$ 10% faţă de frecvenţa nominală, aparatul va da indicaţii cu o eroare de aproximativ 0,5%.

Există nenumărate montaje cu ajutorul cărora se poate obţine decalarea cu 90° a curentului din bobina voltmetrică faţă de tensiunea aplicată acestei bobine necesară realizării unui varmetru electrodinamic. În figura 2 se dă un astfel de montaj, folosit la construirea varmetrelor de mare precizie [2].

Acest montaj este astfel realizat, încît tensiunea obţinută la bornele C şi D este independentă de variaţiile de frecvenţă şi temperatură. Astfel pentru un varmetru la care bobina de tensiune, cu o rezistenţă de 200 Ω, este alimentată de la bornele CD ale acestui montaj, la bornele AB ale acestuia fiind aplicată tensiunea reţelei de 120 V, pentru o variaţie a temperaturii de la 20° $\pm$ 10°C şi o variaţie a frecvenţei între 48 şi 52 Hz, limitele erorilor montajului sînt $\Delta\xi = \pm$ 0,13% şi $\delta = \pm 2{,}8'$.

Aplicînd montaje analoge aparatelor de inducţie, se obţin varmetre de inducţie. Aceste aparate însă, prezintă aceleaşi dezavantaje ca şi wattmetrele corespunzătoare (consum mare, dependenţa de frecvenţă etc.) şi în consecinţă nu sînt recomandate a fi utilizate [4].

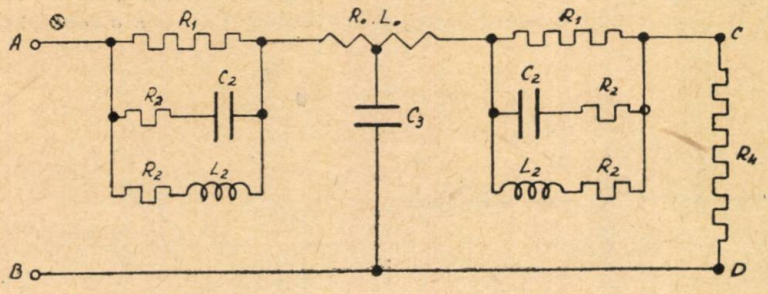


Fig. 2. — Montaj de mare precizie pentru obţinerea unui decalaj de 90°.

În ceea ce priveşte varmetrele termice, acestea se obţin din wattmetrele termice [5] *) la care se înlocuieşte rezistenţa circuitului de tensiune cu un condensator [6] (fig. 3).

Un asemenea varmetru este însă dependent de frecvenţa reţelei astfel că el nu va da indicaţii exacte decît pentru frecvenţa pentru care a fost etalonat.

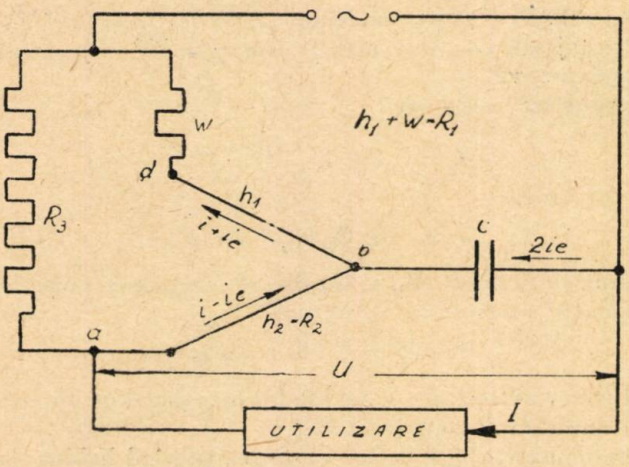


Fig. 3. — Schema de principiu a unui varmetru termic.

În posesia de aparate de măsură, varmetrele, măsurarea puterii reactive din circuitele electrice se face întocmai ca şi măsurarea puterii active, tehnica măsurătorilor neprezentînd nici o particularitate.

2. Măsurarea energiei reactive. Ca şi în cazul măsurării puterii reactive, pentru măsurarea energiei reactive în sistemul monofazat se va folosi acelaşi aparataj ca şi pentru măsurarea energiei active, la care s-au adus anumite modificări.

*) p. 14.

Pentru măsurarea energiei active, cel mai răspîndit aparat este contorul de inducţie a cărui ecuaţie de funcţionare este

$$M = k\,\Phi_U\,\Phi_I\,f\sin\chi, \tag{8}$$

în care Φ_U şi Φ_I reprezintă fluxurile produse respectiv de bobinele de tensiune şi curent, χ unghiul dintre aceste fluxuri, f frecvenţa reţelei şi k o constantă.

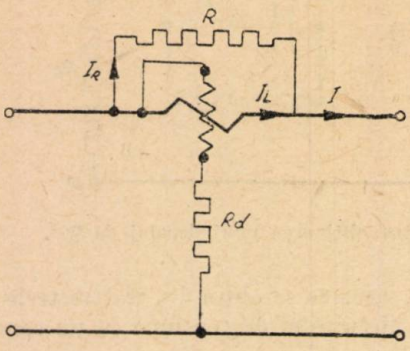


Fig. 4. — Schema de principiu a unui contor monofazat de energie reactivă.

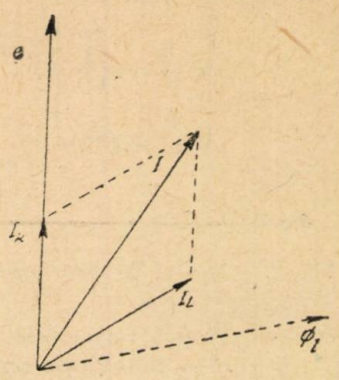


Fig. 5. — Diagrama vectorială a curenţilor din bobina de intensitate a contorului.

Justificarea relaţiei (8) este cunoscută [7] *), [8]**) şi [9] ***).

Dacă se aranjează contorul astfel încît $\chi = 90° - \varphi$ atunci se obţine un contor de energie activă.

Dacă se aranjează astfel încît

$$\chi = \varphi \text{ sau } \chi = 180° - \varphi,$$

atunci relaţia (8) devine

$$M = k\,\Phi_U\,\Phi_I\,f\sin\varphi$$

sau, ţinînd seama că fluxurile Φ_U şi Φ_I sînt proporţionale respectiv cu tensiunea şi curentul aplicate contorului, se obţine

$$M = k'\,f\,U\,I\sin\varphi \tag{9}$$

şi deci, cuplul motor al acestui contor fiind proporţional cu puterea reactivă, contorul este un contor de energie reactivă.

Realizarea unui asemenea contor se obţine şuntînd bobina de intensitate cu o rezistenţă neinductivă [8]****) (fig. 4).

Acţiunea rezistenţei şuntată a bobinei de curent este următoarea: curentul I_L din bobina inductivă a contorului este decalat în urma căderii de tensiune din această bobină, pe cînd curentul I_R din rezistenţa neinductivă R este în fază cu această cădere de tensiune (fig. 5). Curentul total (curentul din utilizare) este deci decalat înaintea curentului I_L. Bobina de curent a contorului este deci alimentată

*) p. 274.
**) p. 144.
***) p. 74.
****) p. 190.

cu curentul I_L în loc de curentul total I, cu care ar fi fost alimentată dacă nu ar exista rezistenţa de şuntaj R. În felul acesta se obţine un decalaj mai mare între curentul total I şi fluxul produs de curent Φ_I. Acest decalaj poate fi variat după voie, acţionînd asupra valorii rezistenţei.

De asemenea se mai poate realiza un contor de energie reactivă monofazat dacă se divide bobina de tensiune în două părţi egale, din care una este conectată direct la reţea, iar cea de a doua fiind în serie cu o rezistenţă [10] *). Sensul de înfăşurare al celor două bobine este contrariu. Construind diagrama vectorială (fig. 6), vectorul fuxului Φ_1 produs de bobina conectată direct la reţea, este dacalată cu 90° în urma tensiunii respective U. Fluxul Φ_2 produs de a doua bobină este de asemenea decalat cu 90° în urma tensiunii respective şi cum înfăşurarea acestei bobine este în opoziţie cu aceea a primei bobine, el va fi reprezentat ca în figura 6. Prin ajustarea rezistenţei în serie, şi deci a poziţiei vectorului Φ_2, se poate obţine ca rezultanta Φ a acestor două fluxuri să fie în opoziţie de fază cu vectorul V, realizîndu-se astfel condiţia necesară obţinerii unui varorămetru de inducţie.

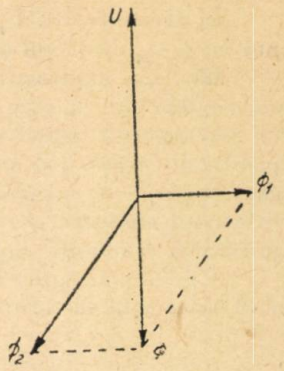


Fig. 6. — Diagrama vectorială a fluxurilor bobinelor de tensiune ale unui contor de energie reactivă.

În ceea ce priveşte erorile de înregistrare ale unui contor de energie reactivă, acesta fiind un contor de inducţie modificat, erorile cunoscute ale acestora vor apărea şi în acest caz. Prin construcţia îngrijită a acestor contoare şi prin dispozitivele de reglaj adaptate, se reuşeşte a se reduce valoarea acestor erori în limitele admise de prescripţii. Modificarea unui contor de inducţie pentru a înregistra energie reactivă nu introduce niciun fel de cauză de eroare suplimentară.

Legarea la reţea a unui contor de energie reactivă nu prezintă nici o dificultate, întrucît toate modificările sînt efectuate în interiorul aparatului şi clema de conexiune este identică cu aceea a unui contor de inducţie pentru energie activă.

Răspîndirea contoarelor de energie reactivă monofazate este destul de redusă, deoarece distribuţia monofazată este limitată la utilizări casnice sau instalaţii mici de forţă, şi măsurarea energiei reactive în aceste cazuri este cu totul excepţională. Trebuie totuşi reţinut faptul că asemenea aparate se pot realiza cu mijloace destul de simple.

B. Regimul deformant

1. Măsurarea puterii reactive. Se ştie că [11]**) regimul alternativ la care cel puţin una din unde, de curent sau de tensiune, nu este sinusoidală este un regim deformant.

Definirea puterii reactive într-un regim deformant nu este încă definitiv precizată. La baza definirii acestei puteri stau astăzi două concepţii diferite [11]***).

Prima concepţie [12], [13] şi [14] este legată de noţiunea de energie medie a cîmpurilor magnetice şi electrice, precum şi de aceea a posibilităţii măsurării

*) p. 44.
**) p. 149.
***) p. 233.

acestei puteri cu aparatele de măsură existente. În regimul deformant, această concepţie conduce la relaţia de definiţie

$$Q_1 = \sum_1^n \frac{1}{m} U_m I_m \sin \varphi_m \tag{10}$$

sau la relaţia de definiţie

$$Q_2 = \sum_1^n m U_m I_m \sin \varphi_m. \tag{11}$$

În aceste relaţii U_m şi I_m reprezintă valorile eficace ale armonicelor de ordinul m, şi φ_m decalajul dintre aceste armonice.

Mărimea exprimată prin relaţia (10) poate fi măsurată printr-un varmetru electrodinamic, la care circuitul voltmetric are o rezistenţă neglijabilă în raport cu reactanţa sa inductivă. Mărimea exprimată prin relaţia (11) poate fi măsurată printr-un *varmetru de inducţie*, al cărui circuit voltmetric trebuie să aibă, ca şi în cazul precedent, o rezistenţă neglijabilă în raport cu reactanţa sa inductivă, sau printr-un *varmetru electrodinamic*, a cărui circuit voltmetric este constituit de o puternică reactanţă capacitivă.

A doua concepţie, se bazează pe principiul separării puterii aparente în regimul deformant în trei termeni ortogonali sub forma

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2,$$

în care P reprezintă puterea reală, Q, puterea reactivă şi D, puterea deformantă. Această concepţie este a profesorului C. B u d e a n u şi conduce la definirea puterii reactive ca suma puterilor reactive ale diverselor armonice [15]

$$Q = \sum_1^n U_m I_m \sin \varphi_m. \tag{12}$$

Cele trei expresii propuse pentru puterea reactivă într-un regim deformant au dat naştere în cercurile tehnice şi ştiinţifice internaţionale la ample discuţii în urma cărora, relaţia (12) este aproape unanim acceptată de electricienii din toată lumea, ea intrînd chiar în standarde de definiţii [16].

Mărimea dată de expresia (12) nu poate fi măsurată cu aparatele de măsură pe care le avem astăzi la îndemînă. Utilizînd varmetrele electrodinamice sau de inducţie, care dau ca rezultat al măsurii expresia (10) respectiv (11), rezultă că în afară de erorile datorite construcţiei aparatului de măsură corespunzător, aceste măsurători vor cuprinde şi o eroare de metodă dată de relaţia

$$\varepsilon_1 = 100 \frac{Q_1 - Q}{Q} = 100 \frac{\sum_1^n \frac{m-1}{m} U_m I_m \sin \varphi_m}{\sum_1^n U_m I_m \sin \varphi_m} \tag{13}$$

corespunzătoare relaţiei de definiţie (10) şi

$$\varepsilon_2 = 100 \frac{Q_2 - Q}{Q} = 100 \frac{\sum_1^n (m-1) U_m I_m \sin \varphi_m}{\sum_1^n U_m I_m \sin \varphi_m} \tag{14}$$

corespunzătoare relaţiei de definiţie (11).

Aceste erori de metodă sînt riguros nule numai într-un regim perfect sinusoidal. În cazurile practice industriale, această eroare are o valoare bine definită. Pentru a ne da seama de ordinul de mărime al ei, nedispunînd de varmetre electrodinamice, sau de inducţie, am calculat aceste erori cu ajutorul descompunerii în armoniu a curbelor de tensiune şi curent ale unor regimuri deformante diferite, [5] *) şi [17] obţinînd rezultatele din tabloul nr. 2.

Tabloul nr. 2

Cazul	Coeficientul de distorsiune % al curbei de:		Decalajul relativ al curbei de curent faţă de curba de tensiune	Puterea reactivă VAR			Abatere %	
				Formula			Formula	
	Tensiune	Curent		10	11	12	13	14
1	3,68	18,90	+ 38°18′	395,66	402,38	397,27	−0,41	+1,29
2	3,58	29,80	− 23°00′	− 273,30	− 295,44	− 276,99	−1,33	−6,66
3	3,91	70,85	+ 7°40′	61,32	60,66	61,26	+0,10	−0,99
4	3,27	14,35	− 34°28′	− 254,72	− 262,19	− 256,03	−0,51	+2,41
5	38,28	10,61	+ 57°27′	432,36	425,54	430,38	+0,46	−1,13
6	32,41	70,80	− 88°05′	− 349,02	− 350,41	− 349,19	−0,05	+0,35

Notă. Semnul (+) la decalajul relativ al curbelor arată că, curba de curent este *în urma* curbei de tensiune şi invers, în cazul semnului (—). Pentru puterea reactivă, semnul (−) arată că aceasta este capacitivă.

Rezultă din acest tablou că indicaţiile unui varmetru electrodinamic sînt mai apropiate de realitate decît acelea ale unui varmetru de inducţie sau ale unui varmetru electrodinamic avînd circuitul voltmetric capacitiv.

Se constată, de asemenea că, în general, în practica industrială, puterile reactive definite în regimul deformant prin relaţia (12), pot fi măsurate cu aparatele electrodinamice monofazate, cu erori mai mici decît erorile admise pentru măsurarea energiei active cu contoare de inducţie şi care sînt de $\pm$ 4%.

În aceste condiţii, şi în cazurile normale ale practicei industriale, se poate admite măsurarea puterilor reactive în regim deformant cu ajutorul varmetrelor electrodinamice obişnuite, ca fiind suficient de admisibilă. Această măsurare este riguroasă în cazul cînd regimul deformant este numai de curent, tensiunea fiind perfect sinusoidală.

2. Măsurarea energiei reactive. Energia măsurată de un contor de inducţie funcţionînd în regim deformant este dată de [4] relaţia

$$W = \sum_1^n W_n = \sum_1^n \frac{k_n' \omega_n^2}{z_n} \int_0^T U_n I_n \sin(\psi_n + \varphi_n)\, dt \qquad (15)$$

în care U_n reprezintă valoarea eficace a tensiunii armonicei de ordinul n, I_n, valoarea eficace a curentului armonicei de ordinul n, φ_n, decalajul între aceste unde, ω_n pulsaţia armonicelor de ordinul n, Z_n impedanţa aparentă a bobinei de tensiune faţă de armonicele de ordinul n, ψ_n unghiul de decalaj între fluxurile produse de bobinele de curent şi de tensiune în cazul armonicelor de ordinul n, k_n' o constantă.

Pentru ca, contorul să măsoare energie reactivă, este necesar ca unghiul ψ_n să fie egal cu 0°, sau 180° pentru *toate* armonicele regimului deformant. Dacă apa-

*) p. 73.

ratul este aranjat astfel încît pentru undele fundamentale de curent şi de tensiune $\psi_1 = 0°$ sau 180°, este foarte puţin probabil ca să avem şi în general $\psi_n = 0°$ sau 180° pentru toate celelalte armonice. În consecinţă, relaţia (15) trebuie scrisă sub forma următoare

$$W_a = \frac{k_1' \omega_1^2}{Z_1} \int_0^T U_1 I_1 \sin \varphi_1 \, dt + \sum_2^n \frac{k_n^1 \omega_n^2}{Z_n} \int_0^T U_n I_n \sin (\varphi_n + \psi_n) \, dt \qquad (16)$$

de unde rezultă că înregistrarea unui contor de inducţie, şi în cazul măsurării energiei reactive, va fi întotdeauna greşită într-un regim deformant.

Aceste concluzii au fost verificate experimental, în ceea ce priveşte contoarele de inducţie de energie activă [5]*). Se poate afirma *a priori* că experienţa va confirma şi concluziile privitoare la varorămetrele de inducţie.

Un contor cu care s-ar putea măsura cu mai mare precizie energia reactivă în regimul deformant, ar fi contorul electrodinamic (contorul Thomson). Într-adevăr, un asemenea contor, construit pentru a funcţiona în curent alternativ şi căruia i s-ar aduce modificările necesare înregistrării energiei reactive, ar înregistra o mărime de forma

$$W_Q = Q_1 \cdot t = t \Sigma \frac{1}{n} U_n I_n \sin \varphi_n$$

şi s-ar putea întîmpla ca erorile respective să fie mai reduse decît în cazul contorului de inducţie. Aceasta se poate afirma şi pe baza încercărilor ce am făcut [5] *) în cazul funcţionării unui contor Thomson ca înregistrator de energie activă în regim deformant.

Întrucît contoarele, atît acelea de energie activă, cît şi acelea de energie reactivă, înregistrează cu erori mai mari în regimul deformant decît în regimul sinusoidal, o soluţie de micşorare a acestei erori constă în a regla contorul, chiar în regimul deformant de funcţionare, ceea ce revine ca aparatul să fie dereglat în regimul sinusoidal [5] **), [18].

În problema măsurării energiei reactive într-un sistem monofazat deformant, experienţa este inexistentă din cauza puţinei răspîndiri a contoarelor corespunzătoare în instalaţiile industriale. Problema rămîne încă deschisă şi prezintă un interesant cîmp de investigaţii.

III. SISTEMUL TRIFAZAT ***)

A. Regimul sinusoidal

1. Măsurarea puterii reactive

a. *Sisteme oarecare de tensiuni şi de curenţi*

În cazul unui sistem trifazat oarecare de tensiuni şi de curenţi, măsurarea puterii reactive se face ca şi măsurarea puterii active, folosind metoda celor q varmetre, în cazul cînd reţeaua are fir neutru, sau a celor $(q - 1)$ varmetre, în cazul cînd reţeaua nu are fir neutru, q fiind numărul de faze al sistemului.

*) p 60.
**) p. 67.
***) Limităm studiul numai la sistemul trifazat, cel mai răspîndiţ. Studierea problemei în cazul general al unui sistem polifazat oarecare nu prezintă dificultăţi, însă nici un interes practic imediat.

Varmetrele folosite sînt varmetre electrodinamice monofazate, realizate aşa cum s-a arătat mai înainte.

Metoda aceasta de măsură are avantajul că poate fi folosită în orice sistem trifazat echilibrat sau dezechilibrat. Prezintă însă dezavantajul că necesită aparate de măsură speciale, varmetre, a căror realizare este mult mai dificilă, sînt deci mai scumpe, care sînt în general influenţate de variaţiile de frecvenţă din reţea şi deci susceptibile de erori suplimentare.

Justificarea utilizării a q sau $(q - 1)$ varmetre este cunoscută şi nu mai revenim asupra ei [19].

b. *Sisteme perfect echilibrate de tensiuni şi curenţi*

În cazul unui sistem trifazat perfect echilibrat atît ca tensiune, cît şi ca, curenţi, utilizarea metodei celor două wattmetre pentru măsurarea puterii active, dă posibilitatea determinării defazajului dintre tensiune şi curent cu ajutorul relaţiei

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{k_1 \alpha_1 - k_2 \alpha_2}{k_1 \alpha_1 + k_2 \alpha_2} \tag{17}$$

în care α_1 şi α_2 sînt indicaţiile celor două wattmetre şi k_1, k_2 constantele de măsură respective. Ţinînd seama că prin această metodă

$$P = k_1 \alpha_1 + k_2 \alpha_2 \tag{18}$$

şi că

$$Q = P \operatorname{tg} \varphi,$$

rezultă că

$$Q = \sqrt{3} (k_1 \alpha_1 - k_2 \alpha_2). \tag{19}$$

Asupra acestei metode trebuie făcute următoarele observaţii:

α) Pe cînd expresia (18) a puterii reale este valabilă, oricare ar fi situaţia reţelei, expresia (19) a puterii reactive nu este valabilă decît în regim echilibrat de tensiuni şi curenţi, această relaţie fiind dedusă din relaţia (17), care nu este valabilă decît în acest caz.

β) Valorile $P_1 = k_1 \alpha_1$ şi $P_2 = k_2 \alpha_2$ avînd o semnificaţie algebrică, ele pot fi pozitive ori negative şi deci urmează a fi introduse în expresia (19) cu semnele lor.

γ) Cele două aparate sînt wattmetre obişnuite de putere reală.

c. *Sisteme echilibrate numai de tensiuni*

α) S-a văzut mai sus (relaţia (5)) că se poate măsura o putere reactivă cu ajutorul unui wattmetru electrodinamic, dacă bobina de tensiune este alimentată cu o tensiune în cuadratură cu tensiunea fazei corespunzătoare.

În sistemele trifazate echilibrate de tensiuni se poate găsi uşor o tensiune în cuadratură cu faza corespunzătoare. Într-adevăr, din diagrama vectorială a tensiunilor (fig. 7) rezultă

$$U_{23} \perp U_{10}, \; U_{31} \perp U_{20}, \; U_{12} \perp U_{30}.$$

În consecinţă, pentru a măsura puterea reactivă într-un sistem trifazat sinusoidal cu tensiunile simetrice şi echilibrate, se vor folosi trei wattmetre electrodi-

namice normale, care se vor monta conform schemei din figura 8, adică bobina de curent a primului wattmetru pe faza 1 şi bobina de tensiune între fazele 2 şi 3 etc.

Utilizarea acestei metode se bazează pe principiul conservării puterii reactive în sistemele trifazate şi corespunde ecuaţiei

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1}{T} \int_0^T (u_{23}\, i_1 + u_{31}\, i_2 + u_{12}\, i_3)\, dt \quad (20)$$

în care

$$u_{12},\ u_{23},\ u_{31}$$

reprezintă valorile instantanee ale tensiunilor compuse,

$$i_1,\ i_2,\ i_3,$$

valorile curenţilor pe fază şi T durata perioadei;

$\sqrt{3}$ apare prin aceea că în montaj se utilizează tensiunile compuse pentru măsurarea puterii reactive pe fiecare fază.

Notînd cu α_1, α_2, α_3 cele trei indicaţii ale wattmetrelor şi prin k_1, k_2, k_3 constantele respective ale celor trei aparate, puterea reactivă din sistem va fi egală cu

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} (k_1\alpha_1 + k_2\alpha_2 + k_3\alpha_3). \quad (21)$$

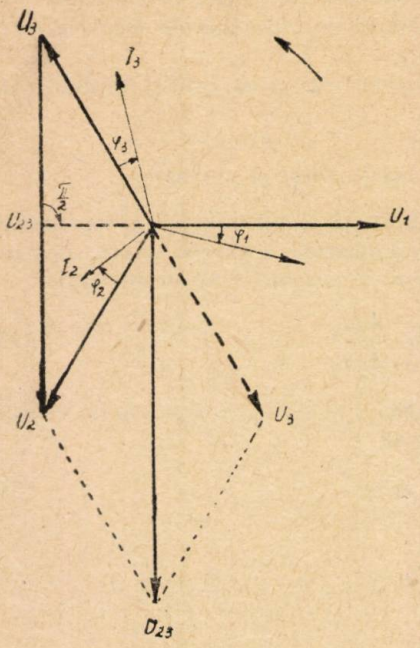


Fig. 7. — Diagrama vectorială a tensiunilor şi curenţilor.

Prin această metodă se măsoară riguros puterea reactivă din circuit în cazul cînd tensiunile compuse din circuit sînt sinusoidale, simetrice şi echilibrate, curenţii putînd fi oricum. Metoda este valabilă pentru circuite cu 3 sau 4 fire. Dacă wattmetrele au nulul la una din extremităţile scării, conexiunile trebuie astfel făcute, încît toate wattmetrele să bată în acelaşi sens. În cazul măsurării puterilor reactive capacitive, este suficient a inversa legăturile la bobinele de tensiune ale tuturor wattmetrelor, aceasta deoarece energia reactivă capacitivă este de sens contrariu energiei reactive inductive.

Înlocuind în relaţia (20) valorile instantanee cu expresiile lor de forma (2) şi (3) şi făcînd calculul se obţine expresia puterii reactive în funcţie de valorile eficace ale tensiunilor şi curenţilor sub forma

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} (U_{23} I_1 \sin\varphi_1 + U_{31} I_2 \sin\varphi_2 + U_{12} I_3 \sin\varphi_3), \quad (22)$$

sau

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[U_{23}\, I_1 \cos\left(\varphi_1 - \frac{\pi}{2}\right) + U_{31} I_2 \cos\left(\varphi_2 - \frac{\pi}{2}\right) + \right.$$

$$\left. + U_{12} I_3 \cos\left(\varphi_3 - \frac{\pi}{2}\right) \right]. \quad (23)$$

Montajul acesta se mai numeşte şi *montajul cu tensiunea în cuadratură* sau cu decalaj intern de 90°. El stă la baza construirii varmetrelor trifazate şi a unei clase de varorămetre trifazate.

În cazul cînd sistemul de tensiuni nu este echilibrat, atunci aparatul nu mai dă indicaţii exacte. Pentru a evalua eroarea de măsură corespunzătoare, se folosesc coordonatele simetrice [20] şi [8] *). Puterea reactivă în funcţie de componentele simetrice [11] **) este dată de relaţia

$$Q = 3U_d I_d \sin\varphi_d + 3U_i I_i \sin\varphi_i \quad (24)$$

pentru montajul din figura 8 componenta homopolară de curent fiind nulă, U_d şi U_i fiind componentele simetrice, directă şi inversă, ale tensiunilor pe fază, I_d şi I_i componentele simetrice ale curenţilor şi φ_d şi φ_i defacalele între *componentele corespunzătoare de curent şi de tensiune.*

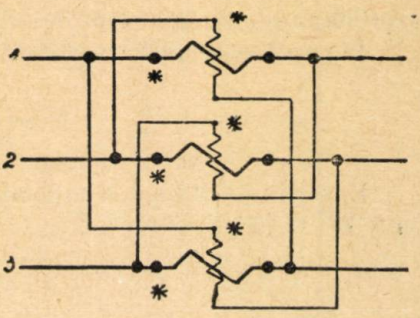


Fig. 8. — Schema de legare a trei watmetre pentru măsurarea puterii reactive într-un sistem trifazat.

Scriind relaţia (23) în cantităţi complexe şi înlocuind vectorii respectivi prin componentele simetrice respective, se obţine puterea reactivă sub forma

$$Q' = 3U_d I_d \sin\alpha + 3\,U_i I_i \sin\beta \quad (25)$$

în care unghiurile α şi β sînt de determinat.

Dacă conexiunile montajului sînt stabilite pentru sensul direct al vectorilor şi se aplică sistemului numai componenta directă a tensiunii, indicaţiile montajului vor fi proporţionale cu $3\,U_d I_d \sin\varphi_d$ şi deci $\alpha = \varphi_d$.

Dacă, fără a modifica conexiunile se inversează sensul de rotire al fazelor, tensiunile auxiliare care în montaj sînt astfel alese încît să fie, pentru sensul direct, în avans cu unghiul de 90°, în general cu unghiul ψ, faţă de sistemul invers se vor găsi în întîrziere cu acelaşi unghi. Cum defazajul în montaj este în urmă cu acelaşi unghi ψ indicaţiile montajului vor fi proporţionale cu $3\,U_i I_i \sin(\varphi_i - 2\psi)$ şi deci $\beta = \varphi_i - 2\psi$ astfel că relaţia (25) devine

$$Q' = 3\,U_d I_d \sin\varphi_d + 3\,U_i I_i \sin(\varphi_i - 2\psi). \quad (26)$$

Mărimea Q' este mărimea care va fi măsurată de montaj în cazul cînd tensiunile între faze nu sînt echilibrate.

Eroarea absolută de măsură va fi

$$\Delta Q = -3U_i I_i [\sin\varphi_i - \sin(\varphi_i - 2\psi)] = - \quad (27)$$
$$- 6U_i I_i \sin\psi \cos(\varphi_i - \psi)$$

iar eroarea relativă

$$\eta = -\frac{2\varepsilon_u \varepsilon_i \sin\psi \cos(\varphi_i - \psi)}{\sin\varphi_d + \varepsilon_u \varepsilon_i \sin\varphi_i} \quad (28)$$

*) p. 224.
**) p. 312.

în care

$$\varepsilon_u = \left|\frac{U_i}{U_d}\right| \quad \text{şi} \quad \varepsilon_i = \left|\frac{I_i}{I_d}\right|$$

exprimă respectiv, gradul de dezechilibrare al tensiunilor şi curenţilor.

În cazul montajului considerat $\psi = 90°$ şi relaţia (28) devine

$$\eta = -\frac{2\varepsilon_u\varepsilon_i \sin\varphi_i}{\sin\varphi_d + \varepsilon_u\varepsilon_i \sin\varphi_i}. \tag{29}$$

Expresia erorii fiind de ordinul doi în raport cu ε_u şi ε_i şi luînd aproximativ $\varphi_i = 90°$ se poate scrie

$$|\eta| \leqslant \left|\frac{2\varepsilon_u\varepsilon_i}{\sin\varphi_d}\right|. \tag{30}$$

Pentru a ne da seama de ordinul de mărime al acestei erori, să considerăm următoarele exemple

Fie un circuit pentru care $\varepsilon_u = 5\%$, $\varepsilon_i = 30\%$ şi $\sin\varphi_d = 0,7$. Aplicînd relaţia (30) se găseşte $|\eta| \leqslant 4.3\%$.

Fie acum un circuit pentru care $\varepsilon_u = 2\%$, $\varepsilon_i = 5\%$ şi $\sin\varphi_d = 0,7$; se găseşte

$$|\eta| \leqslant 0,3\%.$$

Rezultă doar că atîta timp cît gradul de dezechilibrare al curentului şi tensiunii rămîne în limitele admisibile, eroarea de măsură a montajului este acceptabilă.

β) Înlocuind în relaţia (20) tensiunile compuse prin tensiunile simple

$$u_{12} = u_1 - u_2, \qquad u_{23} = u_2 - u_3, \qquad u_{31} = u_3 - u_1$$

şi ţinînd seama că $i_1 + i_2 + i_3 = 0$, sistemul neavînd fir neutru, se obţine

$$Q = \frac{\sqrt{3}}{T}\int_0^T (u_1 i_3 - u_3 i_1)\,dt, \tag{31}$$

care conduce la schema de montaj din figura 9, în care, pentru a obţine semnul minus din expresie, se inversează conexiunile la bobina voltmetrică a primului wattmetru. Cu acest montaj se măsoară riguros puterea reactivă numai în cazul cînd sistemul de tensiuni este perfect simetric şi echilibrat. În caz contrariu, eroarea de măsură este dată tot de relaţia (28), respectiv (29), montajul trebuind să dea măsura aceleiaşi puteri reactive din reţea.

Calculînd expresia (31) se găseşte

$$Q = \sqrt{3}\,[(-U_3)\,I_1 \sin(\varphi_1 + 30°) + U_1 I_3 \sin(\varphi_3 - 30°)]. \tag{32}$$

Ca şi în cazul metodei celor două wattmetre, utilizată pentru măsurarea puterii active, unul din wattmetre, şi anume wattmetrul montat pe faza 3, va da indicaţii în ambele sensuri, în raport cu defazajul reţelei. Astfel, pentru defazaje cuprinse între 0° şi 30°, acest wattmetru va da indicaţii de sens contrariu, decît acelea ale wattmetrului montat pe prima fază: puterea reactivă din circuit se obţine scăzînd indicaţiile wattmetrului 2 din indicaţiile wattmetrului 1. Pentru un defa-

zaj de 30°, wattmetrul 2 stă la zero, iar wattmetrul 1 indică totalitatea puterii reactive din circuit. Pentru defazaje mai mari de 30°, indicaţiile celor două wattmetre se adună.

Acest montaj este utilizat foarte mult în practică, în special la etalonarea contoarelor de energie reactivă.

Cu această schemă se construiesc varmetre şi varorămetre trifazate. De asemenea, din cauza uşurinţei cu care se poate transforma schema, se construiesc aparate care să înregistreze, printr-o simplă comutare, fie puterea activă, fie puterea reactivă din reţea.

Montajul dat în figura 9 face parte tot din categoria montajelor cu decalaj intern de 90°.

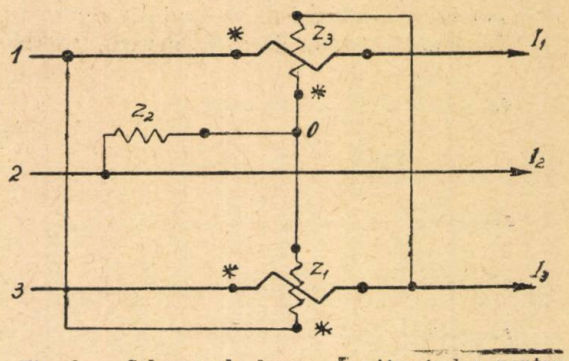


Fig. 9. — Schema de legare a wattmetrelor pentru măsurarea puterii reactive (metoda celor două wattmetre).

2. Măsurarea energiei reactive

a. *Sisteme oarecare de tensiuni şi curenţi*

Ca şi în cazul măsurării puterilor reactive în reţelele în care atît tensiunile cît şi curenţii nu formează sisteme simetrice şi echilibrate, măsurarea energiei electrice se va face cu contoare construite pe principiul celor q varmetre sau (q — 1) varmetre, în care elementele de măsură sînt identice cu acelea ale varorămetrelor monofazate de inducţie sau electrodinamice.

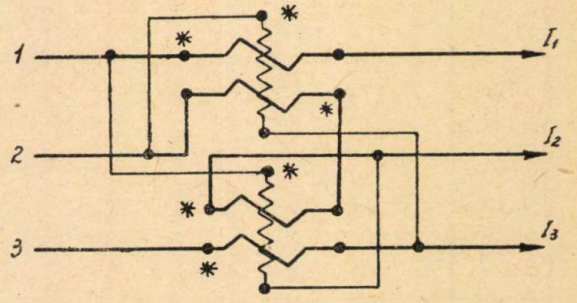


Fig. 10. — Schema de montaj pentru varorămetre trifazate cu 3 sau 4 fire.

Contoarele acestea, deşi au avantajul că pot fi folosite în orice fel de reţea, oricare ar fi situaţia ei de simetrie, sînt mult mai scumpe, construcţia lor necesitînd dispozitive speciale şi precauţii suplimentare.

b. *Sisteme echilibrate de tensiuni*

Pentru măsurarea energiei electrice în reţelele în care tensiunile formează sisteme practic simetrice, se folosesc contoare constituite din elemente care servesc la construirea contoarelor de energie activă, diferind de acestea numai prin modul de conectare al bobinelor. Astfel se realizează contoare de energie reactivă a căror funcţionare corespunde ecuaţiilor (20) şi (31).

Din relaţia (20) se mai pot deduce şi alte scheme de montaje, care, dacă prezintă unele avantaje din punct de vedere teoretic, complică însă construcţia contoarelor făcîndu-le mult mai scumpe, fără ca această complicaţie să contribuie cu mult la îmbunătăţirea măsurătorii efectuate în toate cazurile practice posibile.

Astfel, dacă se ţine seama că într-un sistem echilibrat de tensiuni $u_1 + u_2 + u_3 = 0$ se obţine ecuaţia de funcţionare

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T [u_{23}(i_1 - i_2) + i_{12}(i_3 - i_2)]\, dt, \tag{33}$$

care conduce la schema de montaj din figura 10.

În cazul reţelelor fără fir neutru, ţinînd seama de relaţia $i_1 + i_2 + i_3 = 0$, ecuaţia (33) devine

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T u_{23}(2i_1 + i_3) + u_{12}(2i_3 + i_1)]\, dt \tag{34}$$

care conduce la schema de montaj din figura 11.

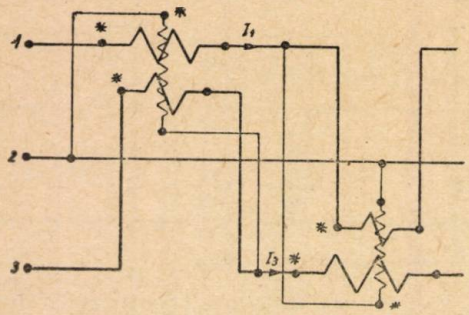


Fig. 11. — Schema de montaj pentru varorămetre trifazate cu 3 fire.

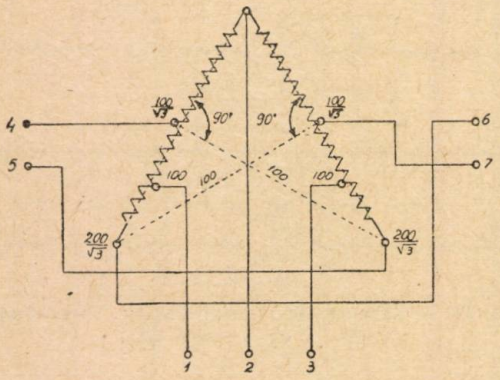


Fig. 12. — Autotransformator de cuadratură.

În sfîrşit, pentru a obţine tensiunea în cuadratură necesară măsurării energiei reactive, au fost construite diferite dispozitive, printre care citãm un autotransformator în V, care se poate monta fie în afara unui contor normal de energie activă, fie în interiorul acestui contor [21], [10]*) şi [8]**) (figura 12). Autotransformatorul se leagă la reţea cu bornele 1, 2, 3 şi bornele de tensiune ale contorului de energie activă se leagă la bornele 4 şi 5 (în loc de 1 şi 2), şi 6 şi 7 (în loc de 3 şi 2). În acest mod, tensiunea între 4 şi 5 este perpendiculară pe tensiunea dintre 1 şi 2 şi are aceeaşi mărime ca aceasta. De asemenea tensiunea 6—7 este perpendiculară pe tensiunea 2—3 şi are aceeaşi mărime cu aceasta.

Ca şi pentru celelalte montaje, funcţionarea acestui autotransformator implică simetria perfectă a tensiunilor reţelei.

Construcţia contoarelor trifazate, folosind oricare din schemele indicate mai sus, se realizează pentru decalaje interioare de 90°, 60° sau 180°, aceste decalaje obţinîndu-se numai prin modul de conectare al bobinelor de tensiune. În figurile 13—18 se dau schemele electrice ale contoarelor de energie reactivă cele mai răspîndite folosind ecuaţiile de funcţionare (20) şi (31). Oricare ar fi tipul de contor utilizat, funcţionarea lor corectă implică simetria perfectă a tensiunilor. În cazul cînd aceasta nu este realizată, atunci eroarea de măsură este dată de relaţia (28) în care ψ este unghiul de decalaj interior.

*) p. 46.
**) p. 240.

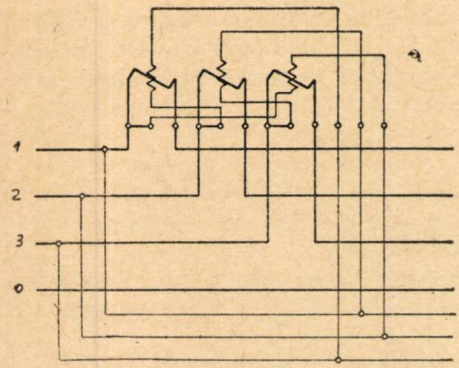


Fig. 13. — Schema electrică a unui centru trifazat de energie reactivă, pentru sisteme cu 4 fire, cu decalaj interior $\psi = 90°$.

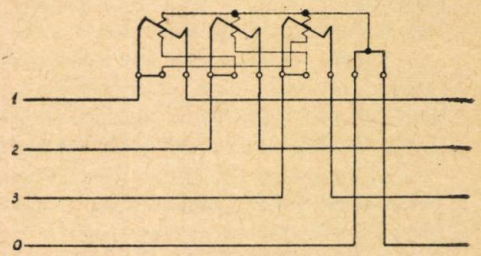


Fig. 14. — Schema electrică a unui contor trifazat de energie reactivă, pentru sisteme cu 4 fire, cu decalaj interior $\psi = 60°$.

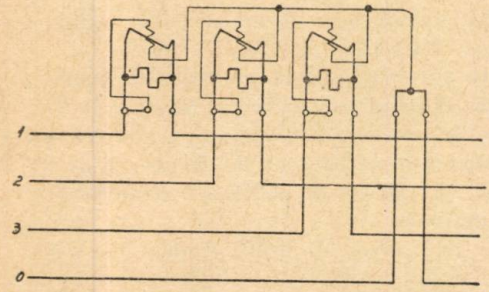


Fig. 15. — Schema electrică a unui contor trifazat de energie reactivă. pentru sisteme cu 4 fire, cu decalaj interior $\psi = 180°$.

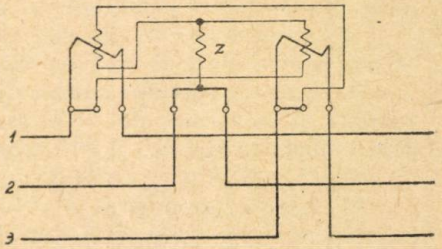


Fig. 16. — Schema electrică a unui contor trifazat de energie reactivă, pentru sisteme cu 3 fire, cu decalaj interior $\psi = 90°$.

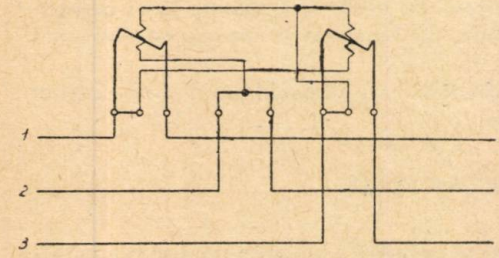


Fig. 17. — Schema electrică a unui contor trifazat de energie reactivă, pentru sisteme cu 3 fire, cu decalaj interior $\psi = 60°$.

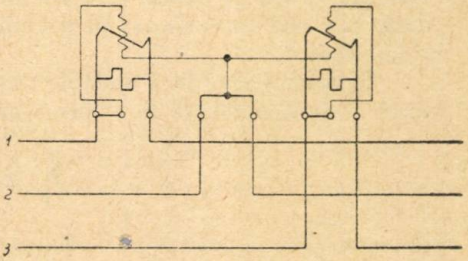


Fig. 18. — Schema electrică a unui contor de energie reactivă, pentru sisteme cu 3 fire, cu decalaj interior $\psi = 180°$.

Rezumînd, pentru măsurarea energiei reactive într-un circuit trifazat se folosesc în general 4 tipuri de contoare de energie reactivă, după cum urmează:

α) Contoare formate din elemente de varorămetre monofazate, montate pe principiul metodei « celor două varmetre » pentru reţele cu 3 fire şi a metodei « celor trei varmetre » pentru reţele cu 4 fire.

Aceste varorămetre au avantajul de a nu fi influenţate de ordinea fazelor şi nici de dezechilibrajul tensiunilor sau curenţilor din reţea. Prezintă însă dezavantajul de a necesita o construcţie specială şi mai dificilă, sînt mai puţin precise, sînt influenţate de frecvenţă, sînt greu de etalonat etc.

β) Contoare formate din elemente de wattorămetre monofazate, montate cu oarecare modificări, în ceea ce priveşte bobinele de tensiune, atît pentru contoarele cu 3 elemente, cît şi pentru acelea cu două elemente.

Aceste varorămetre sînt influenţate de dezechilibrul tensiunilor şi curenţilor, eroarea de măsură pentru dezechilibraje normale fiind acceptabilă în practică. Ele sînt influenţate şi de ordinea de conectare a fazelor. Acest lucru însă se poate observa uşor, deoarece contorul se roteşte în sens contrariu, rezultatele fiind însă exacte în valoare absolută. Se poate restabili funcţionarea normală a contorului, fie inversînd conexiunile la toate bobinele de curent, fie schimbînd două faze între ele.

Acest fel de contoare prezintă însă marele avantaj că sînt uşor de construit, cu elemente obişnuite de contoare de energie activă, uşor de etalonat, fie în laborator, fie la abonat avînd aceeaşi precizie ca wattorămetrele etc.

γ) Contoare de energie reactivă formate din elemente de contoare de energie activă, montate într-un mod anumit, astfel ca să prezinte un decalaj interior de 60°.

Acest tip de contoare cumulează o serie de dezavantaje: necesită o construcţie specială, fiind format din elemente speciale; este influenţat de frecvenţă şi de dezechilibrul tensiunilor şi curenţilor reţelei, precum şi de ordinea fazelor, fapt ce nu poate fi observat cu uşurinţă; greu de etalonat.

δ) Contoare de energie reactivă cu decalaj intern de 180°. Aceste contoare prezintă aceleaşi dezavantaje ca şi precedentele.

B. Regimul deformant

1. Măsurarea puterii reactive

De la început trebuie să se facă o distincţie asupra regimului deformant considerat, şi anume, dacă regimul deformant considerat este caracterizat pe fiecare fază prin unda de curent care nu este sinusoidală, unda de tensiune fiind sinusoidală, sau este caracterizat prin ambele unde, de tensiune şi curent, care nu sînt sinusoidale.

În primul caz, dacă unda de tensiune pe fază este sinusoidală, unda de curent fiind nesinusoidală, şi de o formă oarecare

$$i = \sum_{0}^{\infty} I_n \sqrt{2} \sin (n\omega t - \varphi_n),$$

puterea reactivă pusă în joc în fiecare fază este datorită numai undei fundamentale de tensiune şi curent, fiind aceeaşi pe toate cele trei faze. Expresia acestei puteri reactive pe fiecare fază este

$$Q = U_1 I_1 \sin \varphi_1$$

şi puterea reactivă totală a sistemului va fi

$$3Q = 3U_1 I_1 \sin \varphi_1 = \sqrt{3}\, U I_1 \sin \varphi_1$$

în care $U = \sqrt{3} U_1$ este tensiunea între faze.

În acest caz, măsurarea puterii reactive se face ca şi în regimul sinusoidal examinat în paragrafele precedente.

Să considerăm acum un regim deformant trifazat caracterizat prin undele de tensiune definite de seriile

$$u_1 = \sum_1^n U_k \sqrt{2} \sin k\omega t$$

$$u_2 = \sum_1^n U_k \sqrt{2} \sin k\omega \left(t - \frac{2\pi}{3\omega}\right)$$

$$u_3 = \sum_1^n U_k \sqrt{2} \sin k\omega \left(t + \frac{2\pi}{3\omega}\right)$$

pe care le presupunem simetrice în raport cu fiecare armonică şi care sînt legate în stea.

Curenţii debitaţi pe fiecare fază vor fi de asemenea simetrici, dar nesinusoidali

$$i_1 = \sum_1^n I_k \sqrt{2} \sin k\omega \left(t - \frac{\varphi_k}{k\omega}\right)$$

$$i_2 = \sum_1^n I_k \sqrt{2} \sin k\omega \left(t - \frac{\varphi_k}{k\omega} - \frac{2\pi}{3\omega}\right)$$

$$i_3 = \sum_1^n I_k \sqrt{2} \sin k\omega \left(t - \frac{\varphi_k}{k\omega} + \frac{2\pi}{3\omega}\right)$$

din seriile de mai sus lipsind armonicele de ordinul 3, sau multiplu de 3, dat fiind conectarea în stea a tensiunilor.

Măsurînd puterea reactivă cu ajutorul unui montaj sau a unui aparat corespunzător ecuaţiei de funcţionare (20) se produce o eroare sistematică de măsură prin faptul că diversele armonice ale sistemului formează sisteme trifazate de sensuri diferite [11] *). Astfel armonicele de ordinul 1, 4, 7, 10, 13... $(3\alpha + 1)$ dau sisteme trifazate directe, pe cînd armonicele de ordinul 2, 5, 8, 11, 14... $(3\alpha - 1)$ dau sisteme trifazate inverse. Rezultă dar, că aparatele de măsură vor fi supuse la cupluri motoare de sens diferit.

Fiecare aparat introduce în acest caz o eroare de măsură în raport cu puterea reactivă definită de relaţia

$$Q = \sum_1^n U_m I_m \sin \varphi_m \tag{35}$$

Expresia acestei erori [15] **) este

$$\Delta Q' = \frac{2}{\sqrt{3}} \sum_0^\infty Q_{(3\alpha-1)} \qquad (\alpha = 1, 2\ldots)$$

*) p. 269.
**) p. 326.

şi în consecinţă, indicaţia ansamblului celor trei aparate va fi afectată de eroarea totală

$$\Delta Q = 2\sqrt{3}\sum_{0}^{\infty} Q_{(3\alpha-1)} \qquad (\alpha = 1, 2\ldots)$$

Evaluarea acestei erori se complică în cazul general al unei distribuţii nesinusoidale şi nesimetrice. La eroarea de mai sus, datorită regimului deformant, trebuie adăugată o eroare de măsură datorită nesimetriei fiecărei armonice în parte şi care se evaluează pentru fiecare armonică, cu ajutorul relaţiei (28).

Este necesar deci a examina, în fiecare caz în parte, dacă eroarea de măsurare a puterii reactive, este admisibilă sau nu.

În marea majoritate a cazurilor din practica industrială se pot neglija, în general aceste erori dat fiind forma aproape sinusoidală şi simetrică a tensiunii.

O discuţie făcută asupra montajelor sau aparatelor de măsură care corespund ecuaţiilor (31), (33) şi (34) conduce la aceleaşi concluzii.

În cazul măsurării puterii reactive cu varmetre monofazate sau cu varmetre trifazate, construite din varmetre monofazate, erorile semnalate mai sus datorite regimului deformant şi dezechilibrat nu mai apar. Apar în schimb erorile de metodă datorite folosirii acestor aparate. S-a văzut însă că, folosirea aparatelor electrodinamice conduce la obţinerea de rezultate la care eroarea de măsură este suficient de mică.

Problema măsurării puterii reactive în sistemele trifazate deformante şi dezechilibrate este destul de complexă şi nu poate fi rezolvată complet pe cale teoretică. Această chestiune trebuie elucidată pe cale experimentală pentru a se vedea, în cazurile practice industriale, care este valoarea metodelor de măsură folosite şi a aparatajului rezultant.

2. Măsurarea energiei reactive

Întrucît construcţia contoarelor trifazate de energie reactivă au la bază ecuaţia de funcţionare (20) şi acelea care derivă din aceasta, toate discuţiile făcute în paragraful precedent pot fi repetate şi în acest caz. De asemenea pot fi repetate şi discuţiile privitoare la aparatele construite cu elemente varorămetre monofazate. La consideraţiile de mai sus trebuie adăugat şi faptul că, în general, contoarele de curent alternativ sînt aparate de inducţie şi în consecinţă, la funcţionarea într-un regim deformant ele sînt susceptibile de erori suplimentare.

Este deci cazul de a se examina şi această chestiune, în raport cu limita admisibilă a erorii totale de măsură a acestor aparate şi a se vedea în ce măsură este cazul de a se adopta, pentru măsurarea energiei electrice contoare trifazate electrodinamice, construite din elemente wattorămetre sau varorămetre.

CONCLUZII

Problema măsurării puterilor şi energiilor reactive, deşi are, în stadiul actual al tehnicei o rezolvare practică, nu poate fi socotită complet rezolvată. Într-adevăr, ea a fost soluţionată aproape satisfăcător pentru un caz particular de funcţionare a sistemelor energetice şi anume în acel al sistemelor sinusoidale şi simetrice. În cazul general, aceste sisteme sînt rar realizate. Aproximaţiile ce se fac pentru a admite regimul aproape sinusoidal sau aproape echilibrat nu poate corespunde tuturor situaţiilor din practică. Astfel, măsurarea energiei reactive absorbită de

o înstelaţie, care redresează energia electrică sau aceea absorbită de un cuptor de inducţie monofazat instalat într-o reţea trifazată, nu mai poate fi făcută prin mijloacele obişnuite.

Sînt necesare studii teoretice şi experimentale atît asupra metodelor de măsură, cît şi asupra aparatelor de măsură folosite pentru măsurarea energiei reactive, în special în sistemele energetice trifazate deformante şi dezechilibrate.

Un efort trebuie făcut în realizarea de aparate de măsură pentru puterea şi energia deformantă care să măsoare în regimul deformant expresia adevărată a acestei mărimi

$$Q = \Sigma U_n I_n \sin \varphi_n.$$

În stadiul actual al tehnicei, trebuie examinată problema măsurării puterii reactive în fiecare caz special în parte, pentru ca alegerea greşită a metodelor de măsură şi a aparatelor folosite să nu conducă la erori de măsură inadmisibile.

În realizarea electrificării ţării, problema energiei reactive în general, ocupă un loc important. Este necesar a se da aceeaşi importanţă şi problemei măsurării acestei energii pentru a se putea astfel cunoaşte cu precizie situaţia ei în sistemele energetice şi a se lua măsurile în consecinţă.

ИЗМЕРЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Вопрос измерения реактивных мощностей и энергий не может еще считаться вполне разрешенным. Он был удовлетворительно решен для частного случая синусоидальных и симметричных энергетических систем. Последовательно рассматриваются методы и необходимая аппаратура для измерения реактивной мощности и энергии в однофазных и трехфазных, синусоидальных и несинусоидальных, симметричных и неуравновешенных системах. На основании уравнений, определяющих реактивную мощность, даны схемы установки для измерения реактивной мощности или соответственно реактивной энергии, с указанием практических достижений. Затем рассматривается положение вопроса об использовании этих установок и аппаратов в деформирующих или неуравновешенных энергетических системах и устанавливается круг их применения, а также систематические ошибки, которые они порождают. При настоящем положении техники вопрос измерения реактивной мощности следует рассматривать в каждом случае в отдельности во избежание недопустимых ошибок измерения, могущих быть вызванными неправильным выбором методов измерения и используемых аппаратов.

Вопрос об измерении электрической мощности и энергии остается пока открытым в отношении используемых методов и в особенности постройки измерительных аппаратов, соответствующих всем случаям, встречающимся в практике.

ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. — Схема установки подвижной катушки варметра.

Рис. 2. — Установка большой точности для получения перемещения фаз на 90°.

Рис. 3. — Принципиальная схема теплового варметра.

Рис. 4. — Принципиальная схема однофазного счетчика реактивной энергии.
Рис. 5. — Векториальная диаграмма силы токов в катушке тока счетчика.
Рис. 6. — Векториальная диаграмма потоков в катушках напряжения счетчика реактивной энергии.
Рис. 7. — Векториальная диаграмма напряжений и токов.
Рис. 8. — Схема соединения трех ваттметров для измерения реактивной мощности в трехфазной системе.
Рис. 9. — Схема соединения ваттметров для измерения реактивной мощности (метод двух ваттметров).
Рис. 10. — Схема монтировки трехфазного варметра с тремя проводами.
Рис. 11. — Схема монтировки трехфазного варметра с тремя проводами.
Рис. 12. — Квадратурный автотрансформатор.
Рис. 13. — Электрическая схема трехфазного счетчика реактивной энергии для систем с четырьмя проводами и внутренним перемещением фаз $\psi = 90°$.
Рис. 14. — Электрическая схема трехфазного счетчика реактивной энергии для систем с четырьмя проводами и внутренним перемещением фаз $\psi = 60°$.
Рис. 15. — Электрическая схема трехфазного счетчика реактивной энергии для систем с четырьмя проводами и внутренним перемещением фаз $\psi = 180°$.
Рис. 16. — Электрическая схема трехфазного счетчика реактивной энергии для систем с тремя проводами и внутренним перемещением фаз $\psi = 90°$.
Рис. 17. — Электрическая схема трехфазного счетчика реактивной энергии для систем с тремя проводами и внутренним перемещением фаз $\psi = 60°$.
Рис. 18. — Электрическая схема трехфазного счетчика реактивной энергии для систем с тремя проводами и внутренним перемещением фаз $\psi = 180°$.

MESURE DE LA PUISSANCE ET DE L'ÉNERGIE RÉACTIVE

(RÉSUMÉ)

Le problème de la mesure des puissances et des énergies réactives ne peut encore être considéré comme complètement résolu. Il a été résolu d'une façon satisfaisante pour le cas particulier concernant les systèmes énergétiques sinusoidaux et symétriques. On examine à tour de rôle les méthodes et l'appareillage nécessaire à la mesure de la puissance et de l'énergie réactive dans les systèmes monophasé et triphasé, sinusoïdal et non-sinusoïdal, symétrique et déséquilibré. En se basant sur les équations de définition de la puissance réactive, on obtient les schémas de montage pour la mesure de la puissance réactive, respectivement de l'énergie réactive, en montrant les réalisations pratiques. On discute ensuite le problème de l'utilisation de ces montages et de ces appareils dans des systèmes énergétiques déformants ou déséquilibrés, arrêtant ainsi les limites d'utilisation et les erreurs systématiques auxquelles ils donnent lieu. Il faut, au stade actuel de la technique, examiner séparément pour chaque cas, le problème de la mesure des puissances réactives, afin que des erreurs inadmissibles ne découlent du choix erroné des méthodes de mesure ou des appareils utilisés.

Le problème de la mesure des puissances et des énergies réactives reste encore ouvert, aussi bien en ce qui concerne les méthodes employées que, surtout, touchant la réalisation d'appareils de mesure pouvant répondre à tous les cas requis.

EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — Schéma de montage de la bobine mobile d'un varmètre.
Fig. 2. — Montage de grande précision pour obtenir un décalage de 90°.
Fig. 3. — Schéma de principe d'un varmètre thermique.

Fig. 4. — Schéma de principe d'un compteur monophasé d'énergie réactive.
Fig. 5. — Diagramme vectoriel des courants de la bobine d'intensité du compteur.
Fig. 6. — Diagramme vectoriel des flux des bobines de tension d'un compteur d'énergie réactive.
Fig. 7. — Diagramme vectoriel des tensions et des courants.
Fig. 8. — Schéma de connexion de trois wattmètres pour mesurer la puissance réactive dans un système triphasé.
Fig. 9. — Schéma de connexion des wattmètres pour mesurer la puissance réactive (méthode des deux wattmètres).
Fig. 10. — Schéma de montage pour varheuremètres triphasés, à 3 ou 4 fils.
Fig. 11. — Schéma de montage pour varheuremètres triphasés, à 3 fils.
Fig. 12. — Autotransformateur de quadrature.
Fig. 13. — Schéma électrique d'un compteur triphasé d'énergie réactive, pour des systèmes à 4 fils, à décalage intérieur $\psi = 90°$.
Fig. 14. — Schéma électrique d'un compteur triphasé d'énergie réactive, pour des systèmes à 4 fils, avec décalage intérieur $\psi = 60°$.
Fig. 15. — Schéma électrique d'un compteur triphasé d'énergie réactive pour des systèmes à 4 fils, à décalage intérieur $\psi = 180°$.
Fig. 16 — Schéma électrique d'un compteur triphasé d'énergie réactive, pour systèmes à 3 fils, à décalage intérieur $\psi = 90°$.
Fig. 17. — Schéma électrique d'un compteur triphasé d'énergie réactive, pour systèmes à 3 fils à décalage intérieur $\psi = 60°$.
Fig. 18. — Schéma électrique d'un compteur triphasé d'énergie réactive pour systèmes à 3 fils, à décalage intérieur $\psi = 180°$.

BIBLIOGRAFIE

1. A. Iliovici, Revue générale de l'électricité, 1948, t. LVII, p. 277.
2. H. Polek, Archiv für technisches Messen, 1942, Z. 61—4.
3. G. Keinath, *Die Technik elektrischer Messgeräte*. München, 1928, ediţia III-a, vol. II, p. 101.
4. I. S. Antoniu, Electricitatea, 1951, nr. 8, p. 17.
5. — *Studiul funcţionării aparatelor de măsură într-un regim deformant*. Teză, Bucureşti, 1948.
6. * * * Archiv für technisches Messen, 1935, J. 716—2.
7. C. Budeanu, *Curs de măsuri electrice*. Bucureşti, 1946, vol. I.
8. P. N. Gorionov, S. M. Pighin i N. N. Sumilovski, *Electricieskie sciectiiki*. Moscova, 1951.
9. J. A. Möllinger, *Wirkungsweise der Motorzähler und Messwandler*. Berlin, 1925.
10. G. W. Stubbings, *Electricity meters and meter testing*. Londra, 1939.
11. I. S. Antoniu, *Chestiuni speciale de electrotehnică*, Bucureşti, 1952.
12. A. Liénard, Revue générale de l'électricité, 1921, t. X, p. 547.
13. A. Ilovici, Bulletin de la Société Internationale des éléctriciens, mai 1918, p. 179.
14. — *Définition et mesure de la puissance réactive*. (Communication présentée aux « Journées de Discutions de la SFE» de décembre, Paris, 1924).
15. C. Budeanu, *Puissances réactives et fictives*. Bucureşti, 1927, p. 212.
16. V. M. Lavrov, Electrotehnica, 1953, nr. 3—4, p. 9.
17. C. Budeanu şi I. S. Antoniu, Electricitatea, 1951, nr. 1, p. 9.
18. A. Asta, L'Elettrotechnica, 1953, t. XX, p. 458.
19. C. Budeanu, *Curs de măsuri electrice*. 1946, vol. II, p. 191.
20. V. Genkin, Bulletin de la Société Française des Electriciens, 1926, p. 1148.
21. W. Beetz, Archiv für technisches Messen, 1936, J. 752—4.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul IV, 1954

ELECTROENERGETICĂ

ASUPRA CONSTANTEI DE PROPAGARE A LINIILOR DE TELECOMUNICAŢII

DE

P. POSTELNICU

A. ATENUAREA LINIILOR OMOGENE

După cum se ştie, o linie de telecomunicaţii omogenă sau pupinizată este complet caracterizată din punctul de vedere al transmisiei prin cele două constante secundare: impedanţa caracteristică (Z_c) şi constanta de propagare (γ) şi prin lungimea ei. Partea reală a constantei de propagare, pe care o notăm cu α, reprezintă atenuarea proprie a liniei pe o lungime de 1 km şi formează în general caracteristica cea mai importantă a unei linii de telecomunicaţii.

În tratate şi manualele didactice, valoarea atenuării (α) a unei linii omogene, în funcţie de constantele primare R, L, G şi C ale liniei, este dedusă în linii generale în modul arătat mai jos.

Se consideră ca în figura 1, o linie omogenă, avînd aplicat la capătul A, un generator care dă o tensiune sinusoidală, de frecvenţă unghiulară ω şi la capătul celălalt B, un receptor de impedanţă Z_r.

Se deduce căderea de tensiune şi de curent pe o porţiune de linie de lungime infinit mică. Rezultă două ecuaţii diferenţiale, avînd ca necunoscute tensiunea şi curentul în punctul situat la distanţa x de capătul A al liniei. Prin integrarea acestor ecuaţii şi introducerea condiţiilor la limită, se obţin pentru regimul permanent, în cazul cînd se consideră linia terminată la capătul B, cu impedanţa sa caracteristică, adică $Z_r = Z_c$, următoarele relaţii importante

$$U_x = U_0 e^{-\gamma x}, \qquad I_x = I_0 e^{-\gamma x} \tag{1}$$

în care U_x şi I_x sînt respectiv tensiunea şi curentul în punctul situat la distanţa x de capătul A, U_0 şi I_0, tensiunea şi curentul la origine ($x = 0$), iar γ, o constantă avînd valoarea

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}, \tag{2}$$

denumită constanta de propagare, şi

$$\frac{U_x}{I_x} = \frac{U_0}{I_0} = Z_c, \tag{3}$$

în care

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \tag{4}$$

Din egalitățile (1) rezultă relațiile

$$|U_x| = |U_0|\, e^{-\alpha x}, \qquad |I_x| = |I_0|\, e^{-\alpha x},$$

din care deducem pentru atenuarea a, a liniei pe distanța x, expresia

$$a = \alpha x = \ln\left|\frac{U_0}{U_x}\right| = \ln\left|\frac{I_0}{I_x}\right| = \frac{1}{2}\ln\left|\frac{U_0\, I_0}{U_x\, I_x}\right|, \tag{5}$$

α fiind partea reală a constantei.

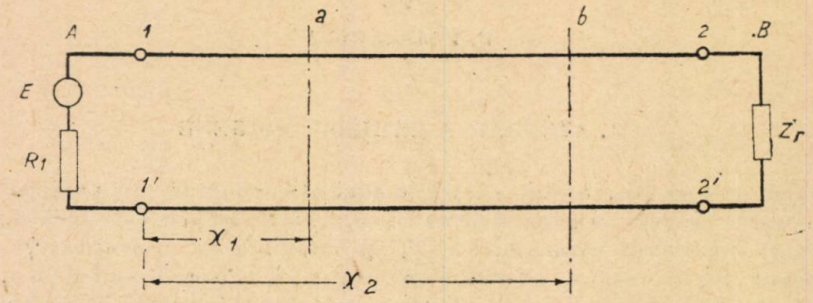


Fig. 1

Expresia constantei α, în funcție de constantele primare, se deduce din relația (2), din care rezultă

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)\,(G^2 + \omega^2 C^2)} + GR - \omega^2 LC\right]}. \tag{6}$$

În afară de aceste formule se mai folosește și următoarea

$$\alpha = \frac{\omega\sqrt{LC}}{\sqrt{\cos\varepsilon \cdot \cos\delta}} \sin\frac{\varepsilon + \delta}{2}, \tag{7}$$

sau altele analoge, deduse tot din relația (2) și în care

$$\operatorname{tg}\varepsilon = \frac{R}{\omega L}, \quad \operatorname{tg}\delta = \frac{G}{\omega C} \text{ sau } \operatorname{tg}\varepsilon' = \frac{\omega L}{R}, \quad \operatorname{tg}\delta' = \frac{\omega C}{G}. \tag{8}$$

Se vede din cele arătate mai sus, că deducerea expresiei constantei α este destul de laborioasă și formulele obținute (6) și (7) sînt destul de complicate și greu de folosit, din care cauză s-au dedus din aceste relații generale și formule simplificate, care dau rezultate suficient de exacte în diferite cazuri particulare, importante în practică. În afară de aceasta, metoda arătată mai sus nu dă posibilitate de a se face legătura dintre constanta și pierderile de putere pe linie, care înlesnește o mai adîncă înțelegere a fenomenului fizic.

În cele ce urmează vom deduce printr-o metodă mai simplă, o nouă expresie a lui α mai puțin complicată și care ajută la înțelegerea fenomenului fizic și dă posibilitatea unei analize imediate a acestei constante.

Pentru aceasta este necesar ca mai întîi să analizăm în de aproape constanta α. Conform definiției generale, valabilă pentru orice cuadripol pasiv, atenuarea unei porțiuni de linii, cuprinsă între două puncte a și b (fig. 1), de lungime arbitrară $\Delta x = x_2 - x_1$, este dată de formula generală

$$a = \alpha \Delta x = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{U_1 I_1}{U_2 I_2} \right| = \frac{1}{2} \ln \frac{S_1}{S_2} \tag{9}$$

în care U_1, I_1, U_2 I_2, reprezintă tensiunile și curenții în cele două puncte extreme, a și b, ale porțiunii de linie, în ipoteza că linia este închisă cu impedanța sa caracteristică ($Z_r = Z_c$). Atenuarea a este deci 1/2 din ln raportului dintre puterea aparentă (S_1) intrată în porțiunea de linie considerată și puterea aparentă (S_2) care iese din această porțiune.

Dacă notăm

$$Z_c = |Z_c| e^{j\varphi},$$

rezultă, ținînd seama și de relația (3), următoarele expresii pentru puterea reală P_1, intrată în porțiunea $a - b$ a liniei prin capătul a și puterea reală P_2, care iese din această porțiune, prin capătul b

$$P_1 = |U_1 I_1| \cos \varphi, \qquad P_2 = |U_2 I_2| \cos \varphi. \tag{10}$$

Din relațiile (9) și (10) rezultă imediat

$$\alpha \Delta x = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{U_1 I_1}{U_2 I_2} \right| = \frac{1}{2} \ln \frac{|U_1 I_1| \cos \varphi}{|U_2 I_2| \cos \varphi} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2}. \tag{11}$$

Cu alte cuvinte, atenuarea este egală cu 1/2 din ln raportului dintre puterea reală primită de porțiunea de linie și puterea reală cedată de aceasta (transmisă mai departe). Relația (11) este valabilă pentru toți cuadripolii simetrici, aceștia avînd cele două impedanțe caracteristice egale. Raportul $\rho = P_2/P_1$ poate fi interpretat ca un randament al porțiunii de linie, iar relația (11) se poate scrie sub forma

$$\alpha \Delta x = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{\rho}. \tag{12}$$

Să considerăm acum că lungimea Δx este mică în raport cu lungimea de undă a frecvenței transmise pe linie. În acest caz, după cum se știe, porțiunea de linie $a - b$ poate fi considerată aproximativ echivalentă cu cuadripolul cu elemente concentrate arătat în figura 2, adică are constantele (de ex. $g = \gamma \Delta x$ și Z_c) egale aproximativ cu cele ale acestui cuadripol. Echivalența devine perfectă cînd Δx tinde spre zero.

Atenuarea a_e a acestui cuadripol are, conform relației generale (11), următoarea valoare

$$a_e = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_2 + \Delta P}{P_2} = \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\Delta P}{P_2} \right) \tag{13}$$

în care $\Delta P = P_1 - P_2$ este consumul de putere reală în cuadripol, egal aproximativ cu consumul în porțiunea de linie $a - b$.

În ipoteza $\Delta P \ll P_2$, din relația (13), se deduce formula aproximativă

$$a_e = \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\Delta P}{P_2}\right) \simeq \frac{1}{2} \frac{\Delta P}{P_2} \simeq \frac{1}{2} \frac{\Delta P}{P_1}, \tag{14}$$

valabilă pentru orice cuadripol simetric în domeniul de frecvență în care atenuarea este mică ($a_e \ll 1$).

Considerînd structura cuadripolului arătată în figura 2 și ținînd seama că $U_1 \simeq U_2$ și $I_1 \simeq I_2$, rezultă următoarea expresie pentru pierderea de putere reală:

$$\Delta P = R\Delta x |I_1|^2 + G\Delta x |U_1|^2, \tag{15}$$

în care primul termen reprezintă pierderile în conductorii porțiunii de linie, iar al doilea, pierderile în dielectricul dintre conductori.

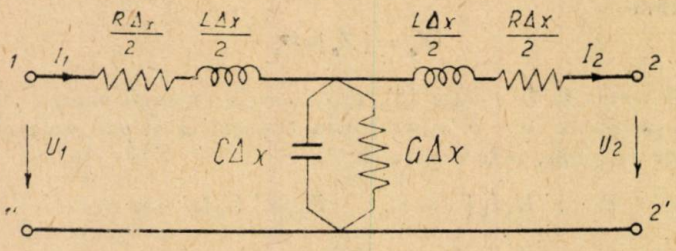


Fig. 2

Introducînd valoarea lui ΔP dată de relația (15) în relația (14), și ținînd seama de relațiile

$$P_1 = |U_1 I_1| \cos \varphi \quad \text{și} \quad |U_1|/|I_1| = |Z_c|$$

deducem

$$\begin{aligned} a_e &= \frac{1}{2} \frac{R\Delta x |I_1|^2}{|U_1 I_1| \cos \varphi} + \frac{1}{2} \frac{G\Delta x |U_1|^2}{|U_1 I_1| \cos \varphi} = \frac{R\Delta x |I_1|}{2|U_1| \cos \varphi} + \frac{G\Delta x |U_1|}{2|I_1| \cos \varphi} = \\ &= \frac{R}{2|Z_c| \cos \varphi} + \frac{G|Z_c|}{2 \cos \varphi} = \frac{R}{2|Z_c| \cos \varphi} + \frac{G}{2|Y_c| \cos \varphi} \end{aligned} \tag{16}$$

Notînd

$$Z_c = R_c + jX_c \quad \text{și} \quad Y_c = G_c + jB_c$$

și ținînd seama că:

$$Z_c = |Z_c| e^{j\varphi}, \quad Y_c = (Y_c) e^{-j\varphi},$$

rezultă

$$|Z_c| \cos \varphi = R_c \quad \text{și} \quad |Y_c| \cos \varphi = G_c.$$

Introducînd aceste ultime relații în egalitatea (16), obținem

$$a_e = \left(\frac{R}{2R_c} + \frac{G}{2G_c}\right) \Delta x. \tag{17}$$

Considerînd lungimea porțiunii de linie $a - b$ infinit mică ($\Delta x = dx$), echivalența dintre această porțiune de linie și cuadripolul din figura 2 devine perfectă, iar

relația (14) exactă, deoarece $\Delta P \to 0$. În acest caz, relația (17) ne dă formula căutată

$$\alpha \Delta x = a_e = \left(\frac{R}{2R_e} + \frac{G}{2G_e}\right) dx$$

sau

$$\alpha = \frac{R}{2R_e} + \frac{G}{2G_e}, \tag{18}$$

în care, așa cum s-a arătat mai sus, R_e este partea reală a impedanței caracteristice a liniei, iar G_e este partea reală a admitanței caracteristice a liniei.

Relația (18) se mai poate scrie și sub formele

$$\alpha = \frac{\sqrt{RG}}{2}\left(\frac{Z_0}{R_e} + \frac{Y_0}{G_e}\right) = \frac{\sqrt{RG}}{2\cos\varphi}\left(\frac{Z_0}{|Z_e|} + \frac{Y_0}{|Y_e|}\right), \tag{19}$$

în care

$$Z_0 = \frac{1}{Y_0} = \sqrt{\frac{R}{G}},$$

reprezintă impedanța caracteristică la frecvența $f = 0$.

Observații. Relația (14) ne arată că dacă p n m $\Delta x = 1$ km, atenuarea unei linii pe 1 km este aproximativ egală cu 1/2 din raportul dintre puterea reală consumată de 1 km de linie și puterea transmisă. De exemplu în cazul unei linii aeriene cu fire de cupru de diametru 3 mm obținem pentru $f = 800$, $\alpha = 0{,}004$ N/km și deci, fiecare km de linie consumă 0,8% din puterea sau din energia pe care o primește.

Relația (18) poate fi dedusă și din expresia (2) a constantei de propagare, în felul următor

Ținînd seama de notațiile (8), rezultă imediat:

$$\begin{aligned} v &= \sqrt[4]{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)}\left|\frac{\varepsilon' + \delta'}{2}\right. \\ \alpha &= \sqrt[4]{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)}\cos\frac{\varepsilon' + \delta'}{2} \\ |Z_e|\cos\varphi &= \sqrt[4]{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{G^2 + \omega^2 C^2}}\cos\frac{\varepsilon' - \delta'}{2}. \end{aligned} \tag{20}$$

Cu ajutorul relației generale

$$\cos\frac{\varepsilon' + \delta'}{2}\cos\frac{\varepsilon' - \delta'}{2} = \frac{\cos\varepsilon' + \cos\delta'}{2} \tag{21}$$

și ținînd seama de relațiile (8), deducem

$$\cos\frac{\varepsilon + \delta}{2}\cos\frac{\varepsilon - \delta}{2} = \frac{\cos\varepsilon + \cos\delta}{2} = \frac{R}{2\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} + \frac{G}{2\sqrt{G^2 + \omega^2 C^2}} \tag{21'}$$

Introducînd valoarea lui cos $(\varepsilon + \delta)/2$ din relaţiile (21) în (20), rezultă relaţia

$$\alpha = \frac{\sqrt[4]{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)}}{\cos\varphi}\left[\frac{R}{2\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} + \frac{G}{2\sqrt{G^2 + \omega^2 C^2}}\right] =$$

$$= \frac{1}{2\cos\varphi}\left[\frac{R}{|Z_0|} + G|Z_0|\right], \tag{22}$$

identică cu relaţia (18).

O altă expresie a constantei α, analogă relaţiei (18), se poate obţine, dacă în formula atenuării (5), introducem puterea reactivă care intră în porţiunea de linie $(a - b)$ sau în cuadripolul echivalent şi puterea reactivă care iese din cuadripol. Procedînd ca şi în cazul folosiri puterii reale, rezultă

$$\alpha \cdot dx = \frac{1}{2}\ln\frac{|U_1 I_1|\sin\varphi}{|U_2 I_2|\sin\varphi} = \frac{1}{2}\ln\left(1 + \frac{dQ}{Q}\right) \simeq \frac{1}{2}\frac{dQ}{Q},$$

$$\alpha = \frac{L\omega|I_1|^2 - C\omega|U_1|^2}{2|U_1 I_1|\sin\varphi} = \frac{L\omega}{2X_c} + \frac{C\omega}{2B_c}, \tag{23}$$

$$\alpha = \frac{\omega\sqrt{LC}}{-2\sin\varphi}\left[-\frac{Z_\infty}{|Z_0|} + \frac{Y_\infty}{|Y_c|}\right], \qquad Z_\infty = \frac{1}{Y_\infty} = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

Formula (23) poate fi dedusă la fel ca (18) şi din expresia constantei γ, ţinînd seama de (8) şi de relaţiile

$$\alpha = |\gamma|\sin\frac{\varepsilon + \delta}{2}, \qquad Z_c = |Z_0|\sqrt{\frac{\delta - \varepsilon}{2}}, \qquad \sin\frac{\varepsilon + \delta}{2}\sin\frac{\varepsilon - \delta}{2} =$$

$$= \frac{\cos\delta - \cos\varepsilon}{2}. \tag{24}$$

Observaţii. Relaţia generală (18) arată că atenuarea unei linii omogene se compune din doi termeni, pe care-i notăm cu α_r şi $\alpha_g - \alpha_r = R/2R_c$, care reprezintă atenuarea datorită pierderilor în conductori şi $\alpha_g = G/2G_c$, care reprezintă pierderile în dielectric.

Relaţia (23) arată că în cazul liniilor de telecomunicaţii ($R/L > G/C$, $\varphi < 0$), atenuarea se compune dintr-un termen pozitiv proporţional cu capacitatea C, (α_c), şi un termen negativ, proporţional cu inductanţa L (α_l), a cărui prezenţă micşorează valoarea atenuării.

Formulele (18) şi (23) deduse în prezenta lucrare prezintă următoarele avantaje:

a) Permit calculul constantei α, atît în funcţie de constantele R, L, C şi G, cît şi îndeosebi în funcţie de constantele R, G sau L, C şi Z_c, aceasta din urmă putînd fi calculată sau măsurată. Este deci suficient ca să deducem expresii aproximative simplificate pentru Z_c, pentru ca să rezulte imediat şi expresia simplificată, cu acelaşi grad de aproximaţie, pentru α.

Astfel, ca exemplu, în cazul frecvenţelor înalte ($R \ll \omega L$, $G \ll \omega C$), avem

$$Z_c \simeq Z_\infty = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad \text{deci} \quad R_t = \frac{1}{G_c} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

și relațiile (18) și (19) ne dau formulele particulare bine cunoscute

$$\alpha = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2}\sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\sqrt{RG}}{2}\left(\frac{Z_0}{Z_\infty} + \frac{Y_0}{Y_\infty}\right). \tag{25}$$

De asemenea în cazul circuitelor în cablu, în domeniul de frecvențe unde avem $R \gg \omega L$, $G \ll \omega C$, rezultă folosind relația (23)

$$Y_c = \sqrt{\frac{\omega C}{2R}} + j\sqrt{\frac{\omega C}{2R}},$$

$$\alpha = \alpha_c = \frac{\omega C}{2B_c} = \sqrt{\frac{\omega CR}{2}}. \tag{26}$$

Se vede că în acest caz termenul α_i, care micșorează atenuarea, este neglijabil.

b) Separă partea de atenuare datorită pierderilor în conductori de aceea datorită pierderilor în dielectric, permițînd prin aceasta o interpretare și o analiză imediată a variației atenuării cu frecvența și parametrii circuitului.

Astfel, din relația (18) rezultă că dacă parametrii primari ai liniei rămîn constanți, partea din atenuare datorită pierderilor în conductori crește cu frecvența deoarece R_e scade, iar cea datorită pierderilor în dielectric scade cu frecvența, deoarece G_e crește. În realitate, constanta G crește repede cu frecvența și face ca și a doua parte să crească cu frecvența, chiar mai repede decît prima, această creștere putînd fi urmărită cu ajutorul relației (18), dacă avem valorile sau graficul constantei G.

De asemenea, din relația (18) deducem că pentru a micșora atenuarea datorită pierderilor în conductori, care predomină la frecvențele joase, îndeosebi la circuitele în cablu, trebuie să mărim valoarea părții reale a impedanței caracteristice. Acest lucru rezultă și din faptul că, dacă puterea transmisă este constantă, mărirea impedanței caracteristice are ca efect o micșorare a curentului pe linie și deci o micșorare a pierderilor Joule în conductori. Cu alte cuvinte, transmisia pe o linie de impedanță înaltă este echivalentă cu un transport de energie la înaltă tensiune. De exemplu, în cazul unui cablu de intrare, care termină o linie aeriană și a cărui lungime este mică în raport cu lungimea de undă a frecvenței maxime transmise, nu este în general indicată folosirea de autotransformatori de adaptare, deoarece aceștia măresc curenții în cablu și deci pierderile în conductori.

O altă aplicație interesantă a relațiilor (18) sau (23) o formează deducerea relației lui Heaviside

$$\frac{R}{L} = \frac{G}{C}. \tag{27}$$

Deducerea acestor relații cu ajutorul formulelor cunoscute (6) și (7) ale lui α este oarecum laborioasă și face să scape o interpretare interesantă a acestei formule, care reprezintă relația necesară între cele patru constante primare pentru a avea o atenuare minimă.

Se vede imediat că factorul

$$\frac{Z_0}{|Zc|} + \frac{Y_0}{|Y_c|},$$

din relaţia (19) este minim cînd cei doi termeni ai săi sînt egali, adică

$$\frac{Z_0}{|Z_c|} = \frac{Y_0}{|Y_c|}, \tag{28}$$

deoarece produsul lor este constant (egal cu 1). Relaţia (28) este echivalentă cu

$$Z_0^2 = |Z_c|^2 \text{ sau } \frac{R^2}{G^2} = \frac{R^2 + \omega^2 L^2}{G^2 + \omega^2 C^2},$$

deci

$$\frac{R}{G} = \frac{L}{C}. \tag{29}$$

În cazul cînd relaţia (29) este satisfăcută, avem $\cos \varphi = 1$ şi deci factorul

$$\frac{1}{\cos \varphi}\left[\frac{Z_0}{|Z_c|} + \frac{Y_0}{|Yc|}\right]$$

este minim şi în consecinţă, parametrul α este minim, parametrii R şi G, fiind consideraţi constanţi.

Minimul de atenuare are loc, conform relaţiilor (25) cînd cele două părţi ale lui α sînt egale ($\alpha_r = \alpha_g$), adică pierderile în conductori sînt egale cu pierderile în dielectric, condiţie asemănătoare cu cea de la maşinile electrice (pierderile în cupru egale cu pierderile în fier). În cazul liniilor de telecomunicaţii, pentru a obţine o atenuare minimă, trebuie să cheltuim aceeaşi energie pentru cei doi agenţi care pot fi consideraţi că transmit energia: cîmpul magnetic, a cărui producere duce la cheltuirea energiei consumate în conductori, şi cîmpul electric, a cărui producere duce la cheltuirea de energie în dielectric.

B) CONSTANTA DE FAZĂ (β) A UNEI LINII OMOGENE

Constanta (β) poate fi dedusă fie cu ajutorul cuadripolului echivalent din figura 2, exprimînd defazarea curentului şi a tensiunii în acesta, fie cu ajutorul relaţiei (2), în modul următor. Din relaţia (2) şi (8) rezultă

$$\beta = |\gamma| \sin \frac{\varepsilon + \delta}{2} = |\gamma| \cos \frac{\varepsilon' + \delta'}{2}. \tag{30}$$

Ţinînd seama de relaţiile generale (21) şi (24), cele două expresii ale lui β din relaţia (30) ne dau

$$\beta = -\frac{R}{2X_c} - \frac{G}{2B_c} = \frac{\sqrt{RG}}{-2\sin\varphi}\left[\frac{Z_0}{|Z_c|} + \frac{Y_0}{|Y_c|}\right], \tag{31}$$

$$\beta = \frac{L\omega}{2R_c} + \frac{C\omega}{2G_c} = \frac{\omega\sqrt{LC}}{2\cos\varphi}\left[\frac{Z_\infty}{|Z_c|} + \frac{Y_\infty}{|Y_c|}\right]. \tag{32}$$

Aceste formule prezintă în general aceleaşi avantaje ca şi formulele (18) şi (23) corespunzătoare lui α.

Astfel, în cazul frecvenţelor înalte, rezultă imediat din relaţia (32):

$$\beta = \omega\sqrt{LC},$$

iar în cazul circuitelor în cablu

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega CR}{2}}.$$

Relațiile (31) și (32) arată că relația lui Heaviside (27) reprezintă în același timp și o condiție de minimum pentru β la fel ca și pentru constanta α.

C) ATENUAREA LINIILOR PUPINIZATE

În practică, în cazul cablelor obișnuite avem

$$R/L \gg G/C,$$

și pierderile în conductori sînt mult mai mari decît în dielectric, așa cum s-a mai spus, dacă frecvența transmisă nu e prea înaltă. Circuitele în cablu omogen obișnuit au o impedanță mică și transmiterea pe ele se face cu tensiune mică și curent mare, ceea ce duce la pierderi mari în conductori.

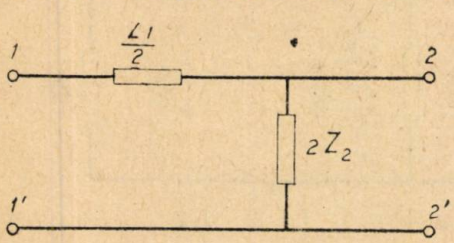


Fig. 3 *a*

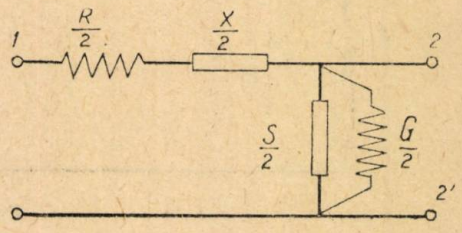


Fig. 3 *b*

Pentru a mări impedanța cablelor și a ne apropia astfel de relația (27), se folosește procedeul de încărcare, fie uniformă (krarupizare), fie concentrată (pupinizare).

Metoda folosită mai sus pentru liniile omogene poate fi aplicată și la deducerea atenuării filtrelor și a secțiunilor de pupinizare, acestea putînd fi echivalate aproximativ cu filtrele trece în jos. În acest scop, să considerăm o semisecțiune de cuadripol, cu structura din figura 3 *a* echivalentă cu cea din figura 3 *b*, în cazul că presupunem

$$Z_1 = R + jX \quad \text{și} \quad \frac{1}{Z_2} = G + jB. \tag{33}$$

Conform definiției generale, atenuarea acestei secțiuni pe care o notăm cu $a/2$, este dată de relația

$$\frac{a}{2} = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{U_1 I_1}{U_2 I_2} \right|, \tag{34}$$

unde U_1, I_1, U_2 și I_2 reprezintă tensiunile și curenții la intrare și ieșire (fig. 4), în ipoteza că impedanța receptorului este egală cu impedanța caracteristică a cuadripolului din capătul respectiv.

Notînd pentru cele două impedanțe caracteristice

$$Z_T = |Z_T| \underline{|\varphi_1} \quad \text{și} \quad Z_\pi = |Z_\pi| \underline{|\varphi_2}.$$

relaţia (34) devine în ipoteza $\cos \varphi_1 \simeq \cos \varphi_2$

$$\frac{a}{2} \simeq \frac{1}{2} \ln \frac{| U_1 I_1 | \cos \varphi_1}{| U_2 I_2 | \cos \varphi_2} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2}, \tag{35}$$

în care P_1 şi P_2 reprezintă respectiv, puterea reală ce intră şi puterea reală ce iese din cuadripol.

Notînd $P_1 = P_2 + \Delta P$ relaţia (35) devine

$$\frac{a}{2} = \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\Delta P}{P_2}\right). \tag{36}$$

În cazul filtrelor cu structura din figura 3 *a*, avem, în zona de trecere,

$$\Delta P \ll P_2 \quad \text{şi} \quad \cos \varphi_1 \simeq \cos \varphi_2,$$

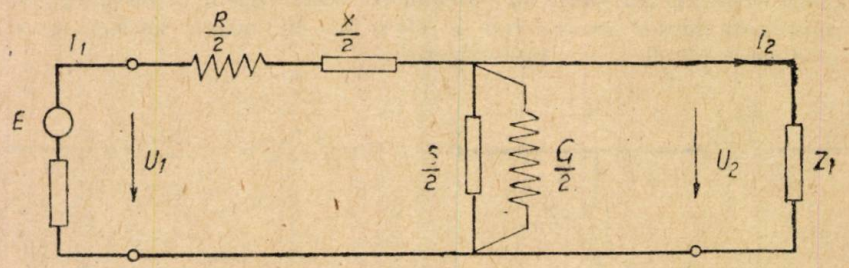


Fig. 4

astfel că relaţia (36) ne dă formula

$$\frac{a}{2} \simeq \frac{1}{2} \frac{\Delta P}{P_2} \simeq \frac{1}{2} \frac{\Delta P}{P_1}, \tag{37}$$

mai generală decît relaţia (14), deoarece nu pune decît condiţiile

$$\cos \varphi_1 \simeq \cos \varphi_2 \quad \text{şi} \quad a \ll 1.$$

În cazul că $\varphi_1 \neq \varphi_2$, atenuarea este dată de relaţia:

$$\frac{a}{2} = \frac{1}{2} \frac{\Delta P}{P_1} + \frac{1}{2} \ln \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1}.$$

Cu ajutorul figurii 4, deducem

$$\Delta P = \frac{R | I_1 |^2}{2} + \frac{G | U_2 |^2}{2}$$

şi introducînd această expresie în relaţia (37), obţinem formulele

$$a \simeq \frac{R | I_1 |^2}{2 | U_1 I_1 | \cos \varphi} + \frac{G | U_2 |^2}{2 | U_2 I_2 | \cos \varphi} = \frac{1}{2 \cos \varphi} \left[\frac{R}{|Z_T|} + G | Z_\pi |\right] \tag{38}$$

sau

$$a = \frac{R}{2Z_T} + \frac{GZ_\pi}{2} = \frac{R}{2Z_T} + \frac{G}{2Y_\pi}, \text{ dacă } \cos \varphi_1 \simeq \cos \varphi_2 \simeq 1 \tag{39}$$

analoge cu relația (18) și valabile, după cum am spus, în domeniul de frecvență în care avem $a \ll 1$ și $\cos\varphi_1 \simeq \cos\varphi_2$. În cazul că nu putem considera $\cos\varphi_1 \simeq \cos\varphi_2$ se poate folosi relația următoare, mai exactă decît (38):

$$a = \frac{R}{2\,|\,Z_T\,|\cos\varphi_1} + \frac{G\,|\,Z_\pi\,|}{2\cos\varphi_2} = \frac{R}{2P_{CT}} + \frac{G}{2G_{C\pi}}.$$

Relația (38) ne permite calculul atenuării filtrului în domeniul de trecere, în cazul că se cunosc impedanțele.

Astfel, la un filtru trece în jos, avem în domeniul de trecere, exceptînd frecvențele joase și cele apropiate de frecvența de tăiere, f_0, zonă oarecum bine delimitată

$$Z_T = \sqrt{\frac{L}{C}}\sqrt{1-\eta^2}\ ,\quad Z_\pi = \sqrt{\frac{L}{C}}\frac{1}{\sqrt{1-\eta^2}}\ ,\quad \eta = \frac{f}{f_0}\ ,\quad \cos\varphi \simeq 1$$

și introducînd aceste valori în relația (38), obținem formula bine cunoscută

$$a = \left[\frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}\right]\frac{1}{\sqrt{1-\eta^2}}, \tag{40}$$

utilizată și pentru secțiunile de pupinizare.

Procedînd la fel ca la liniile omogene, obținem și în cazul unei secțiuni de pupinizare prin introducerea puterii reactive în expresia constantei α următoarea relație

$$\alpha = \frac{1}{-2\sin\varphi}\left[-\frac{L\omega}{|\,Z_T\,|} + \frac{C\omega}{|\,Y_\pi\,|}\right]. \tag{41}$$

De asemenea, se poate deduce pentru constanta de fază a unei secțiuni de pupinizare relații analoge celor de la liniile omogene (23). Aceste relații vor fi tratate însă într-o lucrare separată, deoarece sînt mai complicate și necesită o discuție mai amănunțită, iar constanta de fază prezintă o importanță deosebită în cazul liniilor pupinizate.

Relațiile (38), (39) și (41) pot fi aplicate și secțiunilor de pupinizare și prezintă în general aceleași avantaje ca și relația corespunzătoare (18).

Astfel, în teoria liniilor pupinizate se deduc în mod separat pentru impedanțele caracteristice și pentru atenuare, formule aproximative, aplicabile în diferite zone de frecvență din domeniul de trecere. Relația (38) ne permite ca odată deduse formulele aproximative pentru impedanțele caracteristice, să scriem imediat formulele corespunzătoare pentru atenuare, valabile în aceeași zonă și cu același grad de aproximație.

О ПОСТОЯННОЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПО ЛИНИЯМ ДАЛЬНИХ ПЕРЕДАЧ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Как известно, ослабление по изображениям симметричного четырехполюсника дается общими отношениями:

$$a = \frac{1}{2}\ln\frac{P_1}{P_2} = \frac{1}{2}\ln\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{1}{2}\ln\frac{S_1}{S_2}, \tag{41}$$

в которых S_1, Q_1, P_1, представляют соответственно видимую, активную и реактивную мощность, вошедшие в четырехполюсник с конца A, к которому, как предполагается, присоединен источник тока, а P_2, Q_2 и S_2 являются мощностями, принятыми приемником, соединенным на конце B с полным сопротивлением, равным характеристичному полному сопротивлению четырехполюсника.

Если $a \ll 1$, то из (1) выводим

$$a = \frac{1}{2} \ln \frac{Q_2 + Q_1 - Q_2}{Q_2} = \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\Delta Q}{Q_2} \right) \simeq \frac{1}{2} \frac{\Delta Q}{2Q_2} \simeq \frac{\Delta Q}{2Q_1} \tag{2}$$

$$\text{и } a = \frac{\Delta P}{2P}, \quad a = \frac{\Delta S}{2S}. \tag{3), (4}$$

Применив формулы (2) и (3) к случаю отрезка длиной dx однородной линии с примарными постоянными R, L, G и C и отметив через U и I напряжение и ток в этом отрезке, получаем отношения

$$da = \frac{dP}{2P} = \frac{RI^2 dx}{2UI\cos\varphi} + \frac{GU^2 dx}{2UI\cos\varphi} = \frac{R dx}{2|Z_c|\cos\varphi} + \frac{G|Z_c|\,dx}{2\cos\varphi} = \frac{R dx}{2|Z_c|\cos\varphi} + \frac{G\,dx}{2|Y_c|\cos\varphi} \tag{5}$$

$$\alpha = \frac{da}{dx} = \frac{R}{2R_c} + \frac{G}{2G_c} \quad \text{и} \quad \alpha = \frac{dQ}{2Q dx} = \frac{L\omega I^2 - C\omega U^2}{2UI\cos\varphi} = \frac{L\omega}{2X_c} + \frac{C\omega}{2B_c}, \tag{6}$$

в которых для характерных линий полного сопротивления и полной приводимости использованы обзначения:

$$Z_c = |Z_c| \cos\varphi + j|Z_c| \sin\varphi = R_c + jX_c$$

$$\frac{1}{Z_c} = Y_c = |Y_c|\cos\varphi - j|Y_c|\sin\varphi = G_c + jB_c.$$

Формулы (5) и (6) дают соотношение постоянных α и Z_c линии. Они могут быть выведены из отношения

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}.$$

Подобным же образом выводим для постоянной β однородной линии отношения:

$$\beta = -\frac{R}{2X_c} - \frac{G}{2B_c} = \frac{L\omega}{2R_c} + \frac{C\omega}{2G_c} \tag{7}$$

и для ослабления низкопроходного фильтра или участка пупинизации формулу:

$$a = \frac{R}{2|Z_T|\cos\varphi_1} + \frac{G|Z_\pi|}{2\cos\varphi_2} \simeq \frac{R}{2|Z_T|} + \frac{G|Z_\pi|}{2}, \tag{8}$$

применимую в области проходимости, ($a \ll 1$), в которой R, G, Z_τ и Z_π представляют собой соответственно продольное сопротивление,

поперечную активную проводимость и характеристические полные сопротивления τ и π образных полуучастков рассматриваемого четырехполюсника.

Формулы 5, 6, 7 и 8 могут быть использованы либо для теоретического изучения постоянных α, β и a, либо для вычисления этих постоянных, когда известны значения Z_c.

SUR LA CONSTANTE DE PROPAGATION DES LIGNES DE TÉLÉCOMMUNICATION

(RÉSUMÉ)

On sait que l'affaiblissement sur images d'un quadripôle symétrique peut être exprimé par l'une des relations:

$$a = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2} = \frac{1}{2} \ln \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{1}{2} \ln \frac{S_1}{S_2} \tag{1}$$

où S_1 P_1, Q_1, sont, respectivement, la puissance apparente, la puissance réelle et la puissace réactive à l'entrée du quadripôle où l'on suppose branchée la source d'énergie et S_2 P_2, Q_2, les puissances à la sortie, où l'on suppose un récepteur dont l'impédance est égale à l'impédance caractéristique du quadripôle.

Dans le cas où $a \ll 1$, on déduit de (1):

$$a = \frac{1}{2} \ln \frac{Q_2 + Q_1 - Q_2}{Q_2} = \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\Delta Q}{Q_2}\right) \simeq \frac{1}{2} \frac{\Delta Q}{2Q_2} \simeq \frac{\Delta Q}{2Q_1} \tag{2}$$

et

$$a \simeq \frac{\Delta P}{2P} \quad , \quad a \simeq \frac{\Delta S}{2S} . \tag{3), (4}$$

Si l'on applique les relations (2) et (3) au cas d'un tronçon de longueur dx, d'une ligne homogène, dont les constantes primaires sont R, L, G et C et si l'on désigne par U et I la tension et le courant en ce tronçon, l'on obtient les relations:

$$da = \frac{dP}{2P} = \frac{RI^2\,dx}{2\,UI\cos\varphi} + \frac{GU^2\,dx}{2\,UI\cos\varphi} = \frac{R dx}{2\,|Z_c|\cos\varphi} + \frac{G\,|Z_c|\,dx}{2\cos\varphi} =$$

$$= \frac{R dx}{2\,|Z_c|\cos\varphi} + \frac{G dx}{2\,|Y_c|\cos\varphi} \tag{5}$$

$$\alpha = \frac{da}{dx} = \frac{R}{2R_c} + \frac{G}{2G_c} \tag{6}$$

et

$$\alpha = \frac{dQ}{2Q\,dx} = \frac{L\omega I^2 - C\omega U^2}{2UI\cos\varphi} = \frac{L\omega}{2X_c} + \frac{C\omega}{2B_c}$$

où l'on utilise, pour l'impédance et pour l'admittance caractéristiques de la ligne, les expressions suivantes:

$$Z_c = |Z_c| \cos\varphi + j|Z_c| \sin\varphi = R_c + jX_c$$

$$\frac{1}{Z_c} = Y_c = |Y_c| \cos\varphi - j|Y_c| \sin\varphi = G_c + jB_c.$$

Les formules (5) et (6) donnent les relations générales entre les constantes α et Z_c d'une ligne homogène. Elles peuvent être déduites aussi de la relation:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}.$$

D'une manière analogue, on déduit pour la constante β (le déphasage sur images) d'une ligne homogène les expressions:

$$\beta = -\frac{R}{2X_c} - \frac{G}{2B_c} = \frac{L\omega}{2R_c} + \frac{C\omega}{2G_c} \tag{7}$$

et pour l'affaiblissement sur images d'un filtre passe-bas ou d'une section de pupinisation, la formule:

$$a = \frac{R}{2|Z_T| \cos\varphi_1} + \frac{G|Z_\pi|}{2\cos\varphi_2} \simeq \frac{R}{|Z_T|} + \frac{G|Z_\pi|}{2} \tag{8}$$

qui est valable dans le domaine des fréquances où $a \ll 1$ et dans laquelle R, G, Z_T et Z_π sont, respectivement, la résistance longitudinale, la conductance transversale et les impédances caractéristiques de la mi-section en Γ_T et de la mi-section en π.

Les relations (5), (6), (7) et (8) peuvent être utilisées pour l'étude théorique des constantes α, β et a, ou pour le calcul de ces constantes dans les cas où les valeurs de Z_c sont connues.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul IV, 1954

TERMOENERGETICĂ

SOLUŢII ENERGETICE PENTRU ÎMBUNĂTĂŢIREA CUPTOARELOR DE PRĂJIRE A MINEREURILOR DE FIER ŞI MANGAN

DE

EGY GEZA

În cadrul metodelor de îmbogăţire a minereurilor, care în natură se găsesc sub formă de carbonaţi, are o deosebită importanţă metoda de prăjire. Deoarece majoritatea zăcămintelor noastre de fier şi mangan se găsesc sub această formă, amestecate şi cu alţi carbonaţi ca de exemplu $CaCO_3$ şi $MgCO_3$, metoda de prăjire este aplicată pe o scară largă atît în regiunea Hunedoarei pentru carbonaţii de fier din minele Ghelar şi Teliuc, cît şi în regiunea Vatra Dornei pentru carbonaţii de mangan.

Procesul de prăjire constă în aducerea minereului la temperatura de disociere a carbonaţilor componenţi şi eliminarea bioxidului de carbon transformînd astfel carbonaţii în oxizi. Ca urmare a procesului de disociere, greutatea specifică a minereurilor scade cu 25—30% şi deci conţinutul metalic raportat la unitate de greutate creşte sensibil. Totodată prin creşterea porozităţii minereului, creşte şi reactivitatea lui pentru procesul de reducere la care urmează să fie supus în continuare.

Prăjirea minereurilor se efectuează în cuptoare industriale care s-au dezvoltat pe baza a trei principii diferite:

1. Cuptoare de prăjire prin amestec direct al combustibilului solid cu carbonaţii ce urmează a fi supuşi procesului de prăjire.

2. Cuptoare de prăjire cu combustibil gazos introdus direct între straturile de minereu, arderea combustibilului producîndu-se în golurile formate de bulgării de minereu.

3. Cuptoare de prăjire cu antefocar unde se arde combustibilul, iar minereul este în contact direct numai cu gazele arse care furnizează căldura necesară pentru preîncălzirea şi disocierea carbonaţilor.

Cele mai vechi cuptoare de prăjire se bazează pe principiul expus la punctul 1, adică al amestecului direct al combustibilului solid în straturile de minereu din cuptorul de prăjire. Cuptoarele de acest gen sînt şi în prezent foarte răspîndite, iar în ţara noastră pînă în anul 1952 au fost exclusiv utilizate cu toate deficienţele lor pe care le vom trata mai jos.

Cuptoarele cu amestec direct au fost construite pînă în anul 1922 pe baze pur empirice cu dimensiuni necorespunzătoare scopului (înălţimea de 5—6 m la diametrul de circa 3 m). Regimul termic al cuptorului era nestudiat şi din cauza procesului de prăjire discontinue, cît se poate de neeconomic.

Datorită cercetărilor întreprinse de P. Oberhoffer şi A. Weyel la cuptoarele de prăjire din Siegerland din anul 1922, prin care s-au fixat primele premise bazate pe măsurători executate pe cuptoarele de acolo, s-a declanşat o activitate de cercetări în jurul procesului şi a cuptoarelor de prăjire, activitate ce s-a încheiat prin dezvoltarea cuptorului de prăjire tip Siegerland descris în lucrarea lui Plotzky şi Gleichman în revista Stahl und Eisen în anul 1937.

Cuptorul de prăjire tip Siegerland este construit pe baza unor studii şi cercetări îndelungate şi poate fi considerat ca reprezentantul cel mai perfecţionat al cuptoarelor de prăjire cu amestec de combustibil.

Pe baza acestor cercetări s-a determinat înălţimea optimă a cuptorului (la diametrul de 3 m) la circa 9—11 m şi s-a ajuns la împărţirea cuptorului în 3 zone:

1. Zona de preîncălzire a minereului prin gazele ascendente, rezultate din arderea combustibilului şi disocierea minereului.

2. Zona de prăjire propriu-zisă (zona de temperatură maximă), menţinută în partea centrală a cuptorului cu ajutorul unor termoelemente montate pe locuri potrivite.

3. Zona de răcire a minereului efectuată cu ajutorul aerului de combustie aspirat prin gura de scoatere a minereului.

Aceste măsuri combinate cu trecerea la un regim continuu de încărcare şi descărcare a cuptorului, mecanizarea descărcării, tiraj forţat şi o izolare corespunzătoare a mantalei cuptorului, au avut ca rezultat un randament termic optim (temperatura de ieşire a gazelor arse circa 120°C şi temperatura de scoatere a minereului circa 80—100°C), precum şi o îmbunătăţire a productivităţii acestor cuptoare ajungînd la o producţie de minereu prăjit, de la 40—50 t/zi şi cuptor, la 120—150 t/zi şi cuptor.

Mecanizarea completă a acestor cuptoare nu a reuşit deoarece din cauza necesităţii repartizării uniforme a combustibilului în minereu s-a menţinut adăugarea manuală a acestuia, rămînînd astfel încărcarea cuptorului nemecanizată.

Cuptoarele cu amestec direct de combustibil în minereu prezintă următoarele deficienţe mai importante:

1. Din cauza pericolului de stingere a focului necontrolabil şi neinfluenţabil, este necesar un combustibil superior cu putere calorifică mare.

2. Din cauza diferenţei de granulaţie între minereu şi combustibil, în cursul coborîrii încărcăturii, combustibilul formează cuiburi de foc care duc la aglomerări locale a minereului şi la treceri locale de minereu incomplet prăjit.

3. Produsul obţinut este de calitate inferioară fiind neuniform prăjit, friabil şi conţine cenuşa combustibilului adăugat, avînd nevoie de combustibil superior şi fondant, în plus, la prelucrarea ulterioară, pentru trecerea lui în zgură.

4. Nu se pretează la mecanizarea încărcării din cauza pericolului unei repartizări neuniforme a combustibilului în minereu.

5. Consumul de energie electrică este relativ mare deoarece aerul de combustie şi gazele sînt aspirate de exhaustor prin întreaga coloană de minereu din cuptor, care opune o rezistenţă considerabilă.

6. Deoarece în momentul alimentării gura cuptoarelor este neacoperită, muncitorii încărcători sînt expuşi a inhala gazele din cuptor care, conţinînd mult bioxid de sulf şi praf de minereu, au ca efect boli profesionale grave (silicoză, tbc.).

Avînd în vedere deficienţele de mai sus ale acestor cuptoare, Institutul de energetică al Academiei R.P.R. a întreprins o serie de încercări la un cuptor de prăjire cu amestec reprezentat în figura 1.

Cuptorul avea diametrul de 3 m și înălțimea de 5,8 m. Regimul de lucru era discontinuu, cuptorul fiind încărcat și descărcat o singură dată în 24 de ore.

Capacul cuptorului era în tot timpul perioadei de încărcare deschis și atmosfera pe platforma de lucru aproape de nerespirat. Productivitatea unui astfel de cuptor era de 12 t de minereu prăjit pe zi.

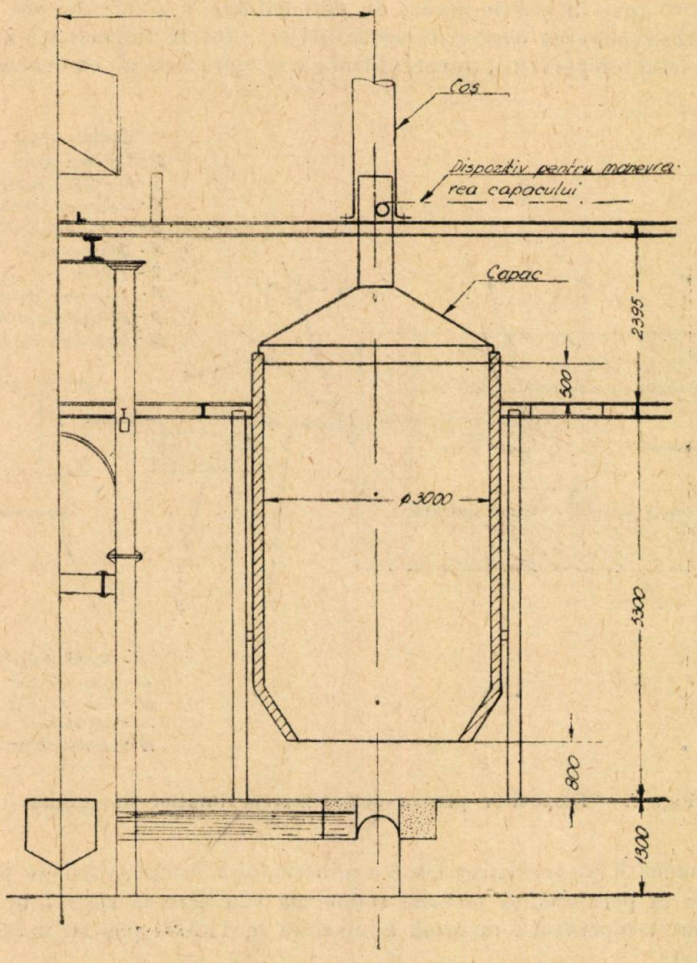


Fig. 1. — Prăjirea minereului cu praf de cărbune.

Volumul cuptorului fiind de circa 42 m³, iar greutatea volumetrică a minereului de circa 1,5 kg/m³ încărcătura reprezintă deci circa 62 t. De aici rezultă că minereul staționa în cuptor pînă la scoatere circa 5 zile.

Problema pusă institutului era, pe lîngă înbunătățirea randamentului și productivității cuptorului, introducerea utilizării gazului de furnal în locul combustibilului solid și eliminarea nocivității pe platforma de lucru a cuptoarelor.

Deoarece din literatura de specialitate lipsesc datele necesare determinării parametrilor de funcționare optimă a cuptoarelor de prăjire și de dimensionare a elementelor constructive, s-au făcut o serie de încercări pentru determinarea lor.

Prima serie de încercări a servit la determinarea procesului de prăjire.

Dispozitivul utilizat este reprezentat în figura 2.

Scopul încercărilor a fost determinarea timpului necesar pentru prăjirea completă (pînă în miezul bucăţilor de minereu), în raport cu mărimea bulgărilor. Pentru determinarea temperaturii maxime admisibile în procesul de prăjire s-au făcut anticipat cîteva încercări de determinare a punctului de vitrifiere a minereului. Determinarea acestei temperaturi este foarte importantă căci la orice depăşire a acestei temperaturi, minereul tinde a se aglomera şi ca urmare a înfunda cuptorul.

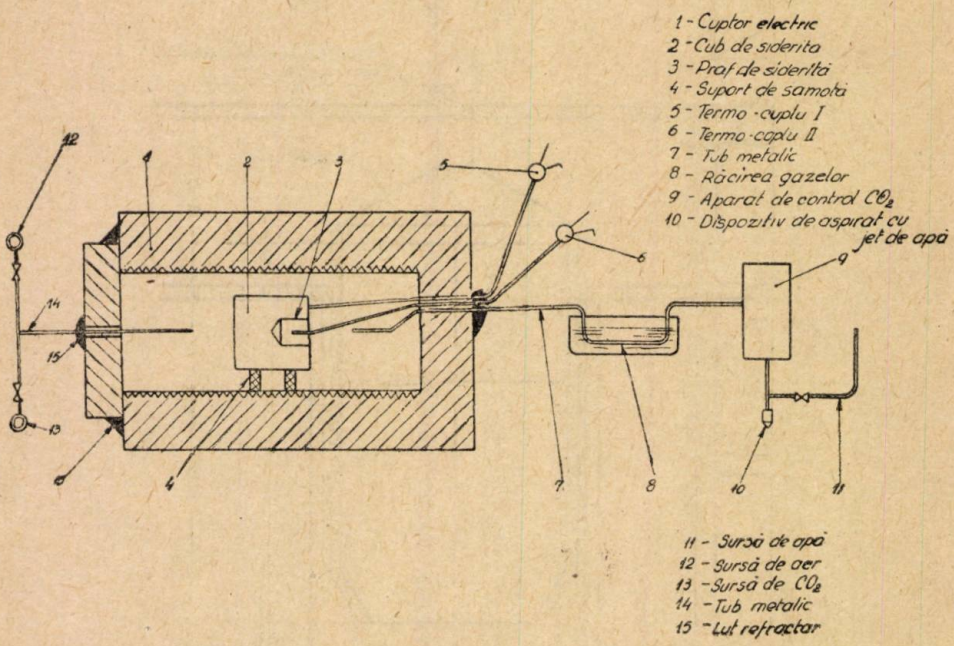


Fig. 2. — Dispozitiv pentru determinarea timpilor de prăjire.

Metoda urmată era încălzirea lentă a minereului la temperaturi de peste 900°C observîndu-se în permanenţă primele semne de vitrifiere la suprafaţa lui. Astfel s-a determinat temperatura maximă admisibilă la 1100°C pentru minereul (siderită) examinat.

Pentru ca rezultatele obţinute la determinarea timpului de prăjire a minereurilor în raport cu mărimea bulgărilor să fie concludente, bucăţile de minereu supuse cercetării, au fost aduse în forme geometrice asemenea.

Pentru o executare mai uşoară s-a ales ca formă geometrică cubul, deşi pentru cercetări ştiinţifice mai aprofundate, ar fi fost necesar să se aleagă forma sferică. Deoarece pentru parametrii căutaţi şi pentru scopul practic urmărit, şi cubul satisfăcea, s-au executat, cuburi asemenea din siderită cu latura de 50, 85, 100 şi 150 mm. S-a ales cubul cu lungimea laturei de 85 mm deoarece reprezintă granulaţia medie a minereului încărcat în cuptor.

Una din laturile cuburilor a fost găurită pînă la centrul cubului. În această gaură, cu sudura caldă exact în centrul cubului, a fost introdus un termocuplu Pl.

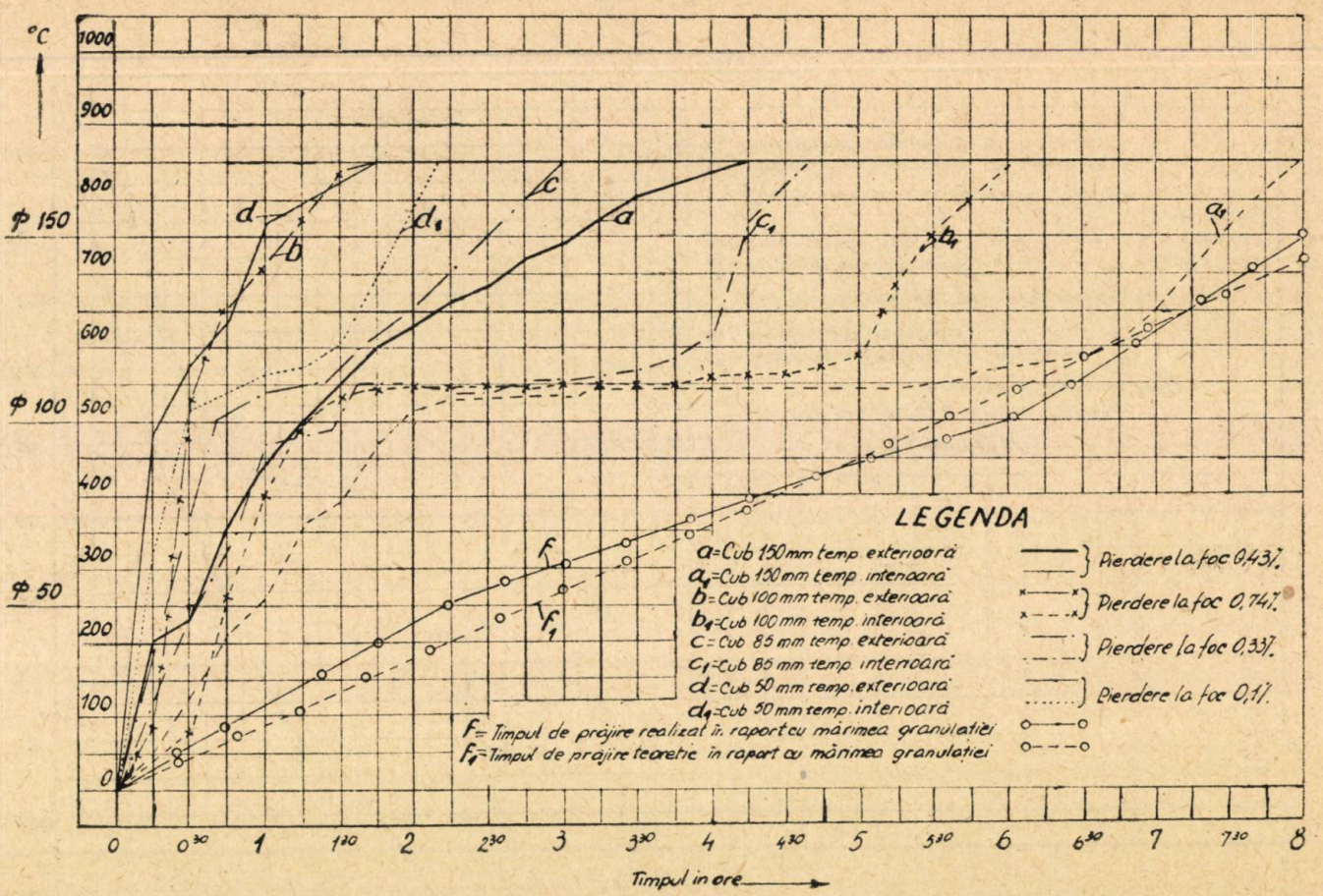


Fig. 3. — Determinarea influenţei mărimii granulaţiei asupra timpului de prăjire a sideritei.

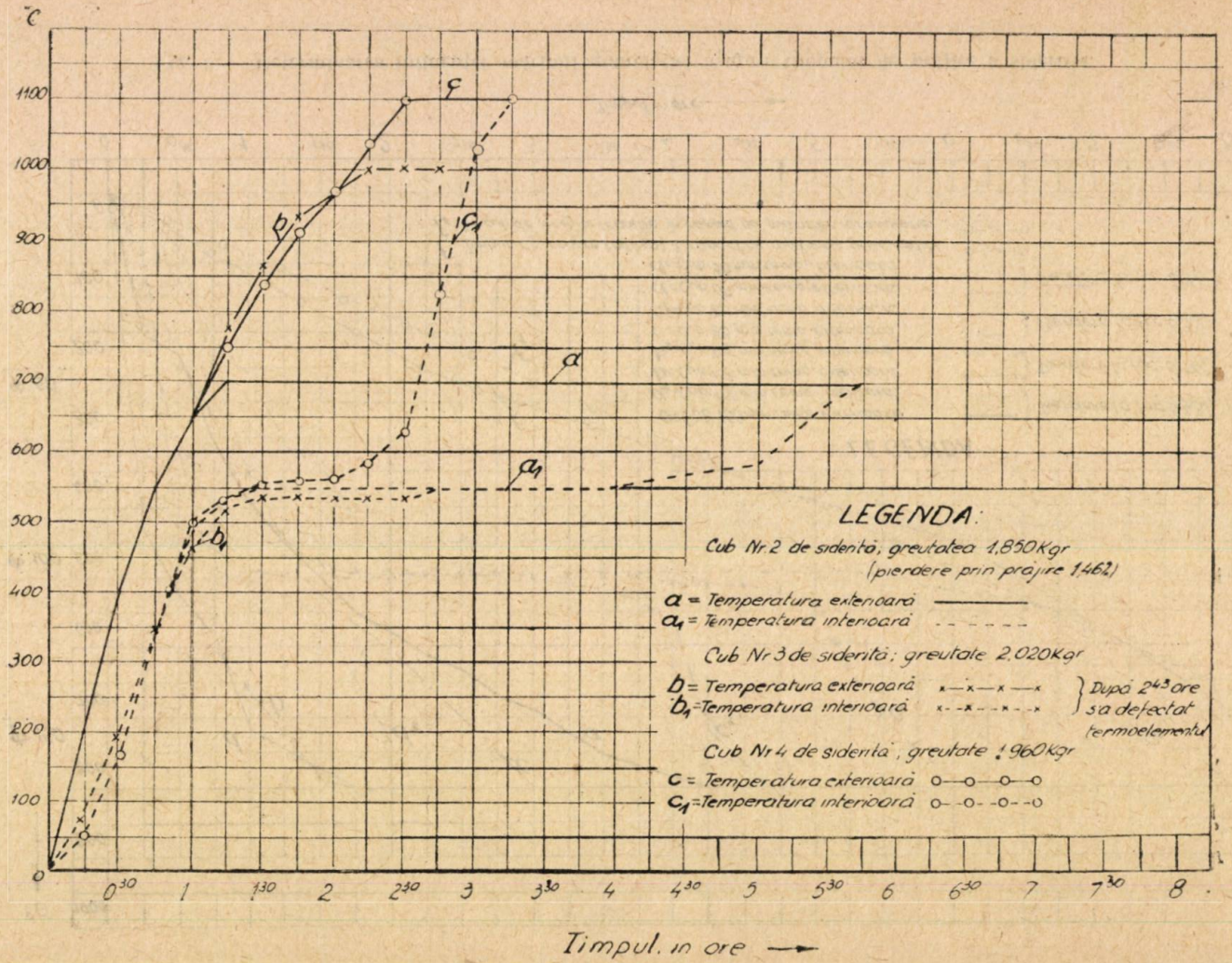


Fig. 4. — Determinarea influenţei temperaturii asupra timpului de prăjire a sideritei.

Pl Rh, apoi gaura astupată cu praf de siderită. Pe suprafața cubului s-a fixat cel de al doilea termocuplu Pl. Pl Rh. Cubul astfel pregătit a fost introdus într-un cuptor electric, citindu-se pe un galvanometru din 15 în 15 minute temperatura la ambele termocupluri.

Încercările au pornit de la temperatura ambiantă, căutînd a se reproduce condițiile de trecere normală a bulgărelui de minereu prin cuptor, de la încărcare pînă la zona de prăjire, prin menținerea diferenței de temperatură între cubul de minereu și atmosfera din cuptor la circa 200°C. Temperatura maximă în cuptor s-a menținut la 850°C, avînd în vedere că în literatura de specialitate temperatura optimă în cuptoarele de prăjire este arătată a fi la 800—900°C (natural depinzînd de punctul de vitrificare a minereului respectiv).

Rezultatele încercării sînt cuprinse în diagramele din figura 3. Din curbele de prăjire reiese că:

1. Temperatura de disociere este la circa 550°C.

2. Timpul necesar de prăjire este la cubul cu latura de 50 mm de circa 1 oră, iar la cubul cu latura de 150 mm de circa 7 ore, deci minereul pus în condiții termice corespunzătoare nu trebuie să staționeze în cuptor 5—6 zile.

3. Timpul necesar pentru preîncălzire, aducerea bucății de minereu pînă la miez la temperatura de disociere, la cubul de 50 mm este de 30′, iar la cubul de 150 mm este de 2 ore și 15′.

Trecînd pe ordonată mărimea bulgărilor și pe abscisă timpul de prăjire a bulgărelui respectiv, obținem funcția liniară (reprezentată în fig. 3) a timpului de prăjire în raport cu mărimea bulgărelui din minereu, pentru temperatura maximă de 850° în cuptor. De aici rezultă că, în condiții termice identice, timpul necesar pentru prăjirea bulgărelui de minereu este o funcție liniară a mărimii lui.

Concluziile trase din aceste încercări au avut cea mai mare importanță pentru determinarea zonelor termice în cadrul studiului de transformare ce s-a executat în continuare la cuptorul de prăjire (fig. 1).

Pe cînd prin încercările de mai sus s-a determinat relația între timpul necesar pentru prăjire și mărimea bulgărelui de minereu, ținînd constant temperatura maximă, a doua serie de încercări a servit, la determinarea relației între timpul necesar pentru prăjire și temperatură, menținîndu-se constantă mărimea cubului de minereu.

Încercările acestea s-au efectuat cu cuburi de 85 mm și temperatura maximă în cuptor s-a menținut pentru primul cub la 700°C, pentru cel de al doilea la 1000°C și pentru al treilea la temperatura maximă admisibilă, fără pericol de vitrifiere, adică la 1100°C.

Rezultatele sînt cuprinse în diagramele din figura 4 din care se poate trage drept concluzie că este recomandabil a se alege temperatura de prăjire cît mai aproape de punctul de vitrifiere, deoarece prin această măsură se scurtează mult timpul necesar pentru prăjire (de exemplu pentru cubul de 85 mm de la 5 ore și 45′ pentru temperatura maximă în cuptor de 700°C la 3 ore și 15′ pentru temperatura maximă în cuptor de 1100°C).

A treia serie de încercări a servit la determinarea influenței presiunii parțiale a bioxidului de carbon, asupra timpului necesar pentru prăjire, menținîndu-se constantă temperatura maximă în cuptor și mărimea bulgărelui de minereu la 85 mm. În cursul acestor încercări, atmosfera din cuptor a fost condiționată cu ajutorul unei butelii de aer și a unei butelii de bioxid de carbon (fig. 2), astfel că la prima încercare conținutul de CO_2 a fost menținut la 0% în atmosfera din cuptor, la a doua la 30% și la a treia încercare la 50%. Concentrația bioxidului de

carbon a fost controlată în tot timpul încercărilor cu ajutorul unui aparat Orsat luîndu-se probe din 15′ în 15′.

Rezultatele sînt redate în diagramele din figura 5 şi drept concluzie se poate afirma că, în concentraţii tehnologic posibile în cuptor, influenţa bioxidului de carbon asupra timpului necesar pentru prăjire este practic neglijabilă.

Problema procesului de prăjire fiind suficient de lămurită, în urma încercărilor de mai sus, pentru ca pe baza lor să fie luate măsuri de îmbunătăţire a prăjitorului, s-a trecut la executarea unei alte serii de încercări în vederea determinării permeabilităţii straturilor de minereu pentru gaze.

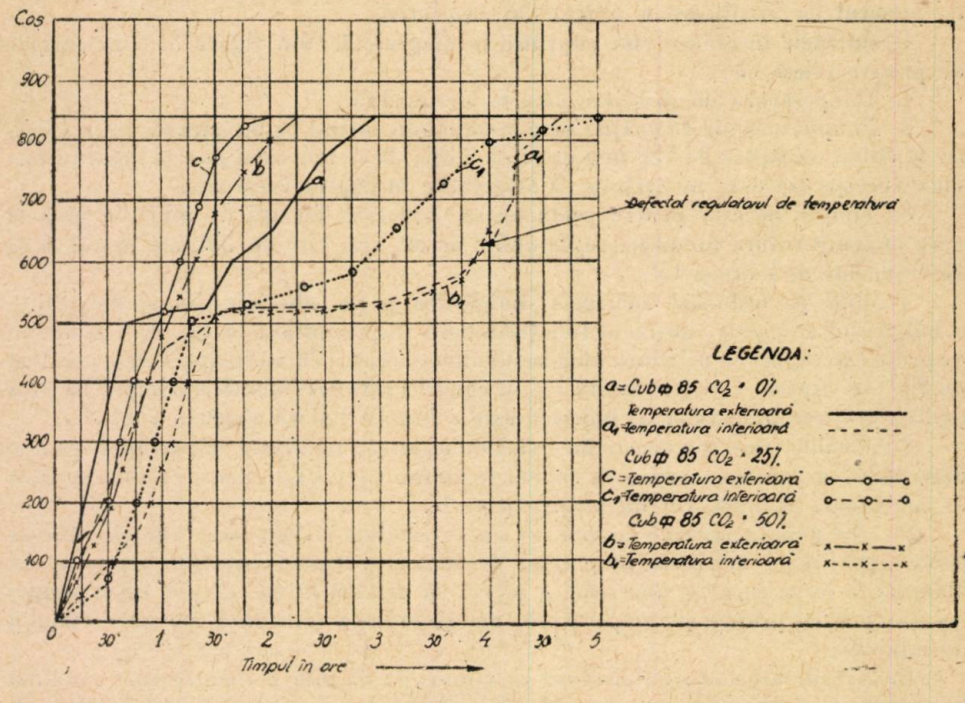


Fig. 5. — Determinarea influenţei presiunii parţiale a — CO_2 asupra timpului de prăjire a sideriţei.

Deoarece în ultima analiză productivitatea unui cuptor de prăjire depinde de cantitatea de gaze purtătoare de căldură ce poate trece prin straturile de minereu în unitate de timp, cunoaşterea condiţiilor de permeabilitate este de mare importanţă pentru dimensionarea corespunzătoare a instalaţiei de ardere pentru gaz de furnal.

În acest scop s-a utilizat dispozitivul arătat în figura 6.

Acest dispozitiv constă dintr-un tub de fontă de 600 mm aşezat în poziţie verticală, astfel ca gura de jos să fie la circa 1 m deasupra solului. Tubul s-a umplut cu minereul avînd o granulaţie determinată, a cărei permeabilitate urma să fie stabilită. Apoi, gura de sus a tubului s-a închis cu un capac de tablă bine etanşat.

Capacul a fost legat, prin intermediul unei ţevi, la gura de aspiraţie a unui ventilator. În ţeava de legătură, la distanţe reglementare, a fost montată o şaibă de strangulare normală, în vederea determinării debitelor de aer aspirate de ven-

tilator prin coloana de minereu din tub, iar în dreptul gurii de aspirație a ventilatorului s-a prevăzut un organ de închidere, cu ajutorul căruia, s-a fixat presiunea deasupra coloanei de minereu.

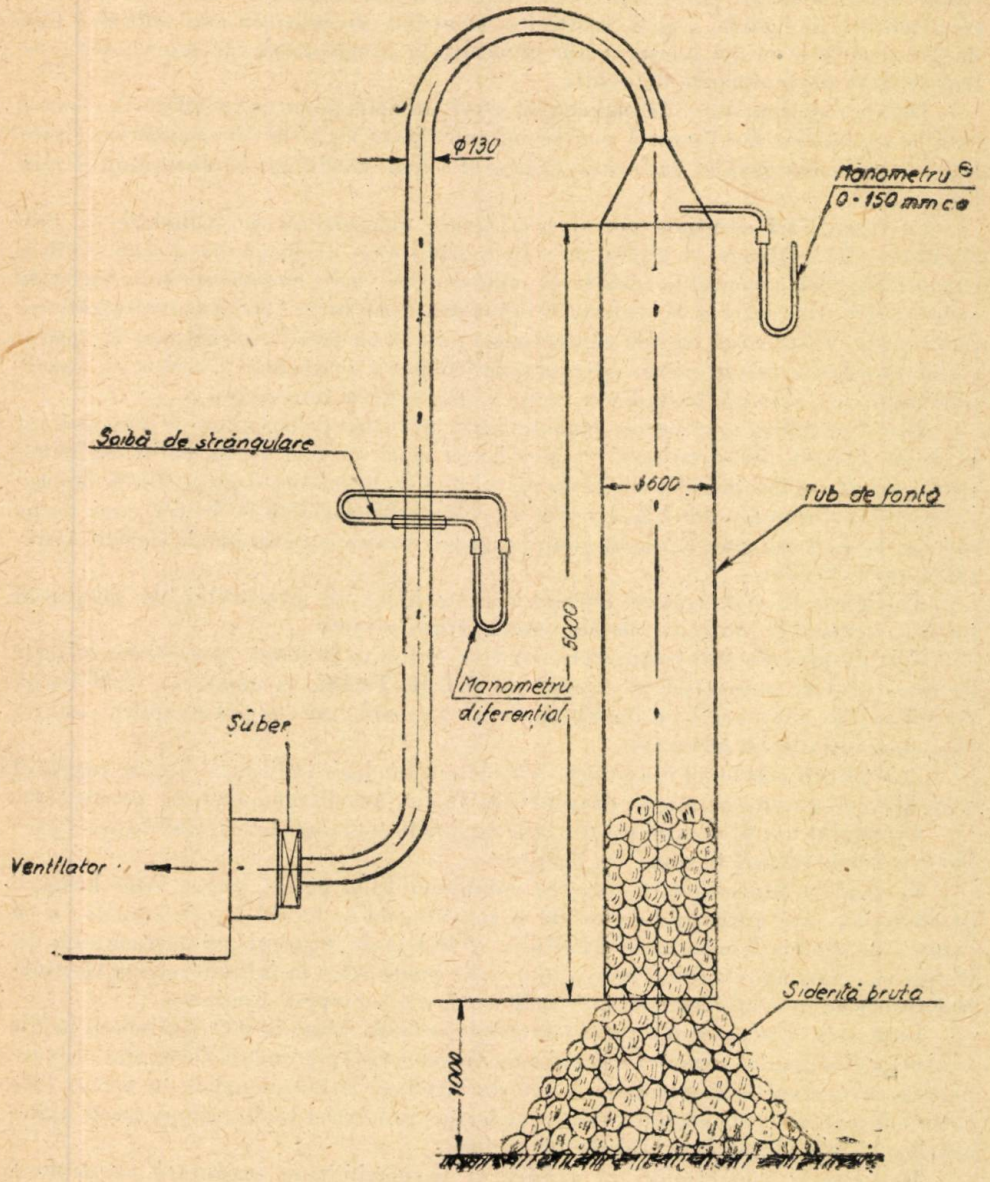


Fig. 6. — Dispozitiv pentru determinarea permeabilității.

Această presiune a fost determinată cu ajutorul unui manometru în mm, coloană de apă, iar diferența de presiune provocată cu șaiba de strangulare, cu ajutorul unui manometru diferențial.

Presiunea deasupra coloanei de minereu a fost variată cu ajutorul organului de închidere de la gura de aspirație a ventilatorului și diferențele de presiune de la șaiba de strangulare au fost înregistrate. Din aceste diferențe au fost apoi calculate debitele de aer corespunzătoare. Pentru a obține curbele de permeabilitate reprezentate în figurile 7 și 8, înălțimea stratului de minereu care inițial a fost de 2 respectiv 3 m, s-a micșorat din jumătate în jumătate metru repetîndu-se de fiecare dată determinările de debit.

Datele experimentale de mai sus au servit la determinarea modificărilor necesare la cuptoarele din figura 1 pentru înbunătățirea lor și la dimensionarea instalației de ardere a gazului de furnal. Cuptorul a fost modificat conform schiței din figura 9.

Ca modificări esențiale pot fi considerate dispozitivul de închidere cu con și contra con acționat cu troliu care dă posibilitatea de încărcare permanentă a cuptorului, fără a periclita sănătatea muncitorilor prin emanațiile produselor de ardere, apoi dispozitivul de ardere, compus din două inele exterioare de arzătoare pentru gaz de furnal și cu con central care poartă un cerc de arzătoare de gaz și totodată micșorează grosimea stratului de minereu ce trebuie pătruns de gazele purtătoare de căldură în vederea prăjirii uniforme a minereului.

Drept rezultat, cuptoarele transformate pe baza principiilor de mai sus au o productivitate de aproximativ trei ori mai mare ca cele vechi, calitatea minereului prăjit s-a înbunătățit simțitor, restul de CO_2 în minereul prăjit fiind, la cuptoarele transformate, sub 1%, pe cînd la cele vechi se ridică la 4—6%, iar de pe platforma de lucru s-au eliminat complet gazele toxice care au pus în pericol sănătatea muncitorilor.

În figura 10 sînt arătate curbele caracteristice ale procesului de prăjire în lungul cuptorului, obținute la cuptoarele transformate.

Cele de mai sus sînt rezultatele pozitive obținute în urma încercărilor inițiate de Institutul de energetică al Academiei R.P.R. Totuși, în acest caz fiind vorba de măsuri de adaptare la o instalație deja existentă, nu s-a putut aplica soluția optimă rezultată din încercări.

Soluția cea mai bună din punct de vedere tehnologic indiscutabil este cuptorul de prăjire cu antefocar, unde minereul este în contact direct numai cu gazele arse.

Avantajul net al acestei soluții față de cea precedentă este reglabilitatea perfectă a temperaturii în zona de prăjire.

Pe cînd la cuptoarele cu arderea combustibilului gazos, direct între bulgării de minereu, este aproape inevitabilă o supraîncălzire locală a minereurilor și ca urmare se produc fenomene de vitrifiere, și în caz de neatenție a personalului de deservire, chiar aglomerarea minereului, care poate duce la înfundarea cuptorului; la cuptoarele cu antefocar această deficiență este complet eliminată.

Cuptoare de acest gen au o productivitate mare (pînă la 300 t minereu prăjit la zi și cuptor) și sînt complet mecanizate. Gazele arse într-un antefocar sînt diluate pentru reducerea temperaturii sub cea de vitrifiere a minereurilor cu aerul, care se ridică prin zona de răcire a minereurilor prăjite astfel încît aglomerarea minereurilor și înfundarea cuptorului sînt excluse.

Rezultatele încercărilor de prăjire și permeabilitate executate arată două principii de înbunătățire a acestor cuptoare din punct de vedere energetic care se contrazic reciproc:

1. Pentru a avea un randament termic optim este necesar ca cuptorul să fie cît mai înalt pentru ca gazele și minereul prăjit ce ies din cuptor să aibă temperatură cît mai apropiată de cea de ambianță.

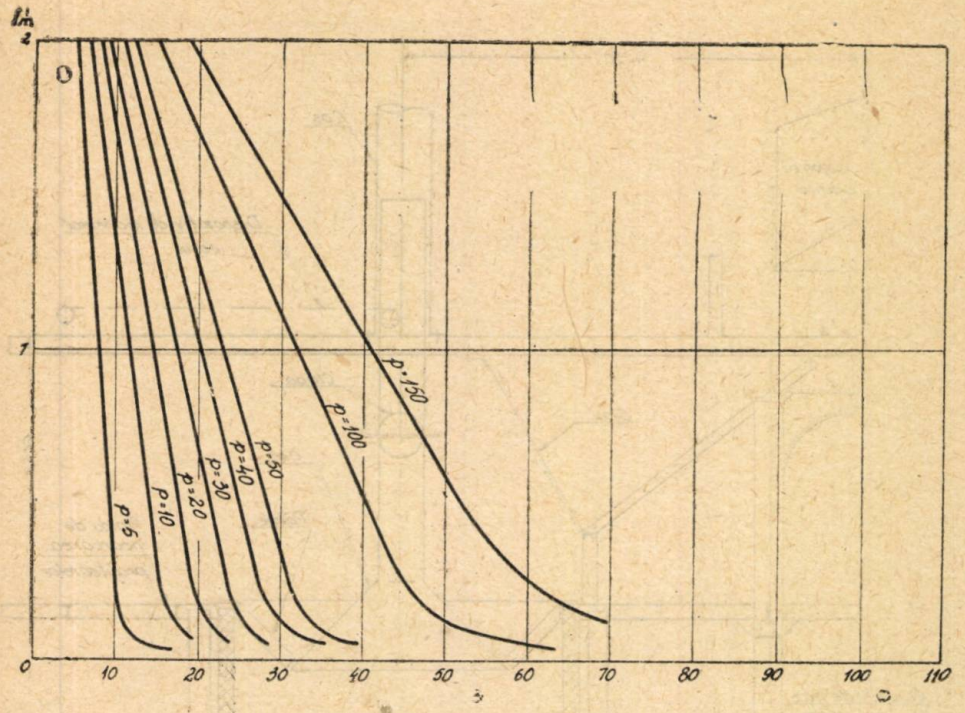


Fig. 7. — Încercări de determinare a permeabilității la siderită. Granulația sideritei 20—50 mm.

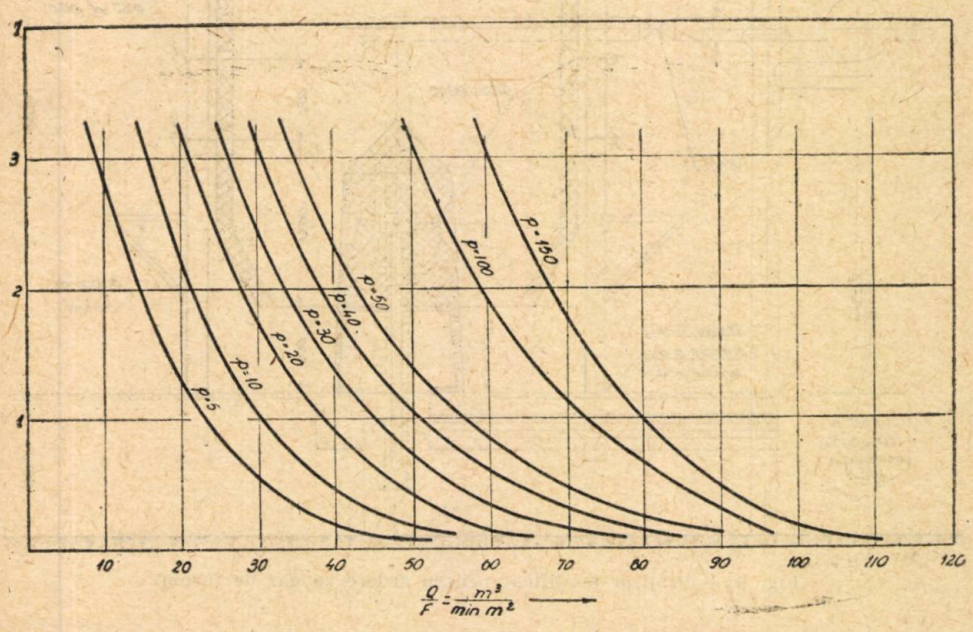


Fig. 8. — Încercări de determinare a permeabilității la siderită. Granulația siderite 50—100 mm.

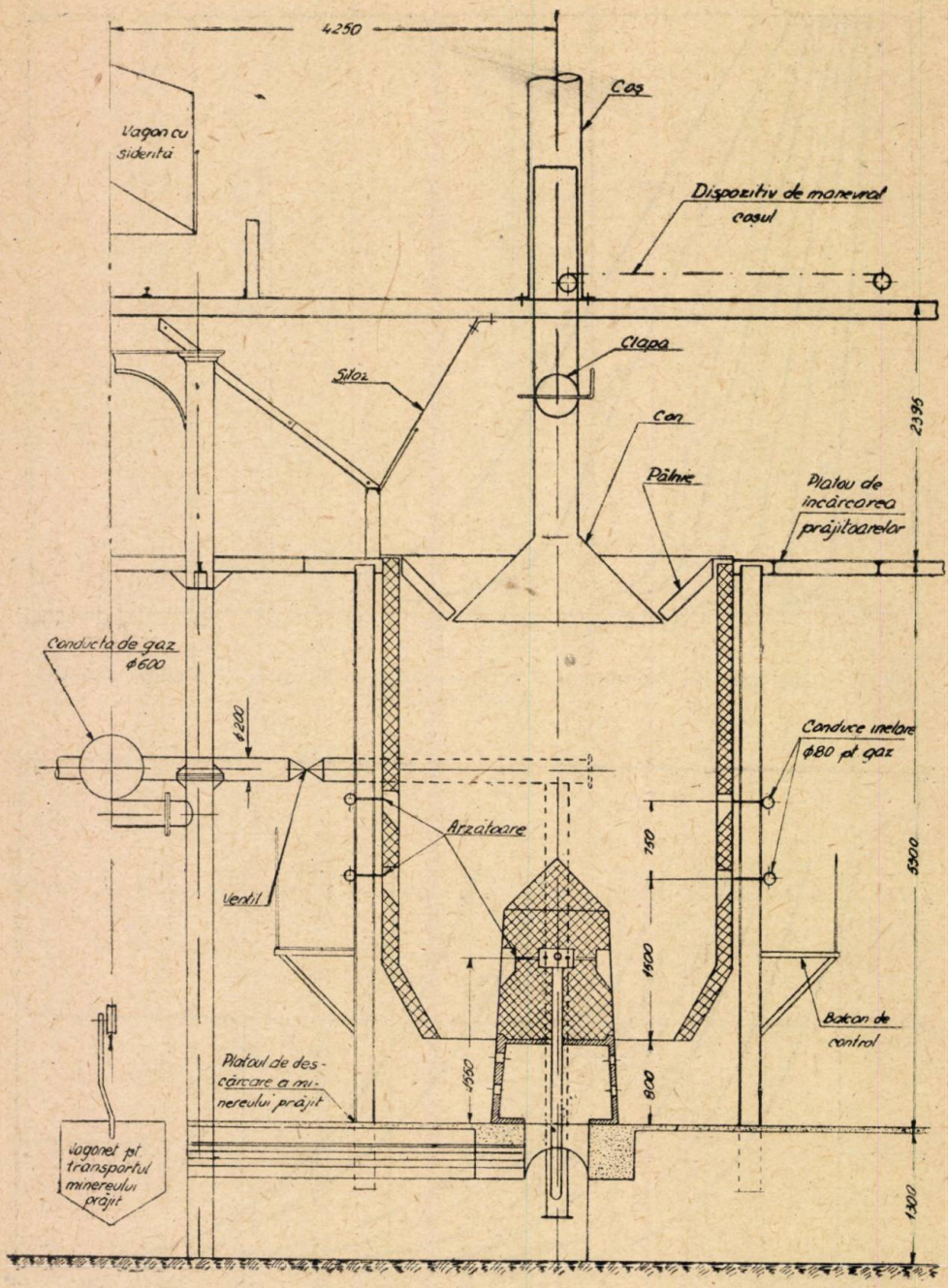


Fig. 9. — Prăjitor modificat pentru ardere cu gaz de furnal.

2. Pentru a avea pierderi minime de energie cinetică la gazele ce trec prin cuptorul de prăjire, este necesar ca secțiunea perpendiculară pe direcția trecerii gazelor să fie cît mai mare, iar drumul străbătut prin straturile de minereu cît mai scurt.

Cuptoarele de prăjire cunoscute pînă în prezent rezolvă problema de la punctul 1 în detrimentul celei de la punctul 2 și în consecință necesită exhaustoare puternice pentru aspirarea gazelor prin stratul înalt de minereu. Abia prin cuptorul

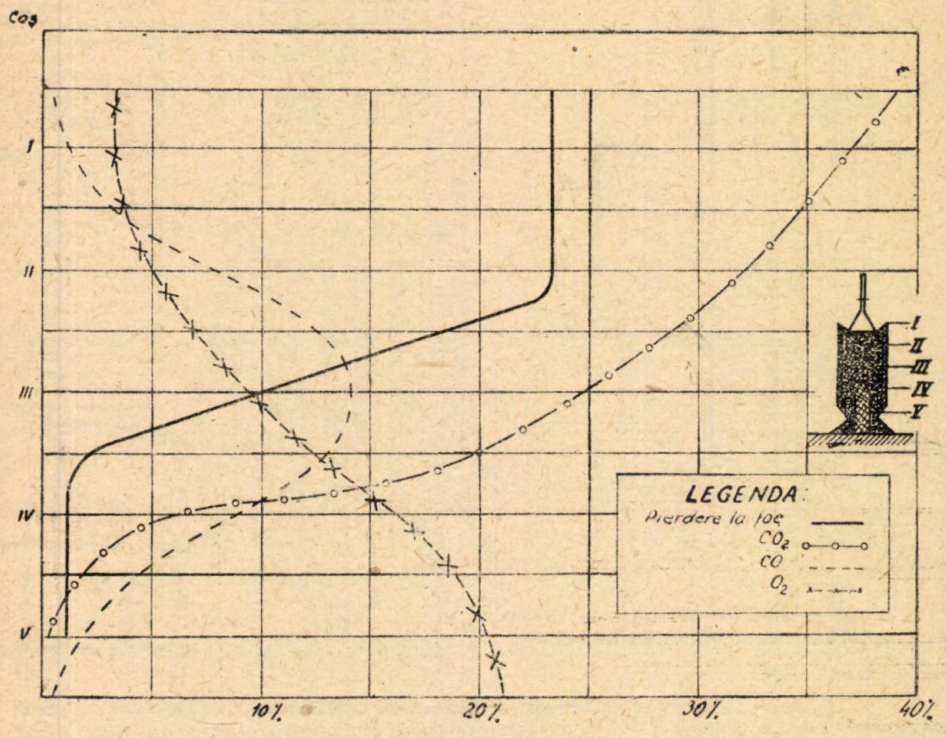
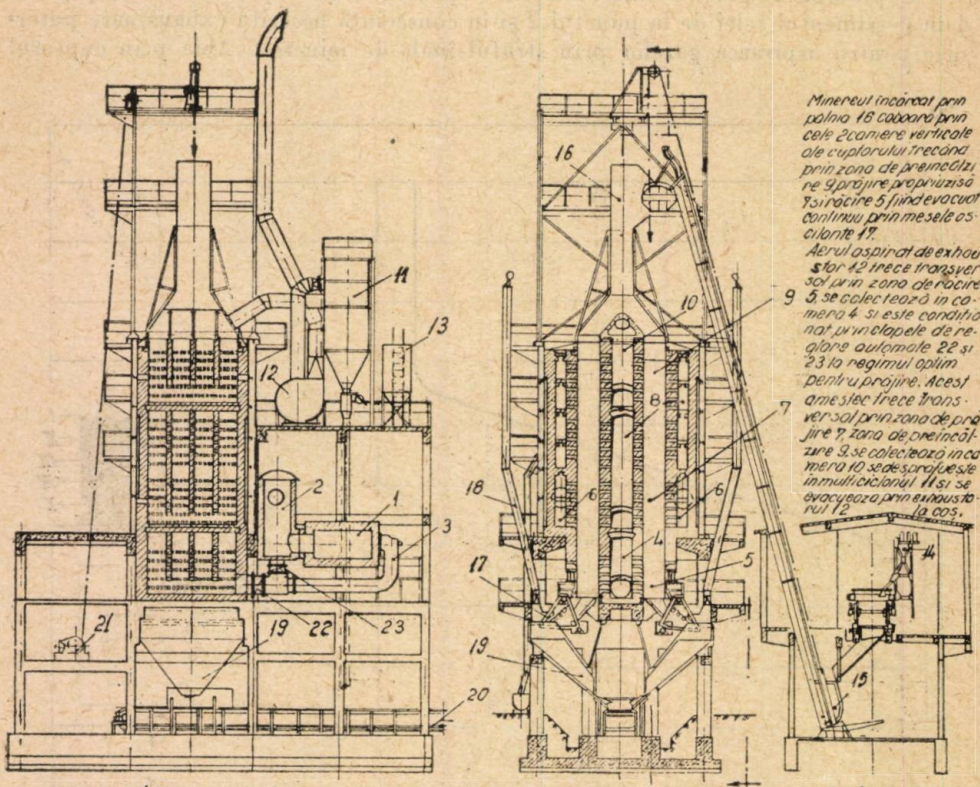


Fig. 10. — Diagrama curbelor caracteristice luate cu ocazia încercării prăjitorului cu gaz de furnal.

de prăjire reprezentat în figura 11 și proiectat la IPROMET pe baza învățămintelor trase din încercările expuse mai sus ale Institutului de energetică se realizează o soluție comună pentru cele două principii opuse.

Acest cuptor de tip nou a fost conceput pentru o productivitate de 300 t/zi minereu prăjit. Are un antefocar în care se arde combustibilul cu aerul primar introdus sub focar printr-un ventilator, apoi produsele în trecerea lor prin focar se diluează cu aerul secundar adus din aceeași cameră de aspirație de unde se alimentează și ventilatorul de aer primar. Diluarea gazelor arse este controlată printr-un termocuplu instalat în camera de distribuire a gazelor. Termocuplul influențează asupra unui regulator de temperatură, iar regulatorul acționează asupra clapetei de admisie a aerului în camera de aspirație. Dacă temperatura gazelor are tendința de scădere, regulatorul legat de termocuplul ce controlează această temperatură dă un impuls în direcția închiderii clapetei de admisie a aerului, iar

la tendinţa de ridicare a temperaturii un impuls în direcţia deschiderii acestei clapete, lăsînd să treacă mai puţin sau mai mult aer de diluare în vederea menţinerii gazelor ce intră în cuptor la o temperatură constantă optimă pentru procesul de prăjire.



1. Focar; 2. Cameră de amestec; 3. Conducta de aspiraţie a aerului preîncălzit; 4. Camera de aspiraţie a aerului preîncălzit; 5. Zona de răcire a cuptorului; 6. Camera de admisie a gazelor; 7. Zona de prăjire a cuptorului; 8. Camera de trecere a gazelor; 9. Zona de preîncălzire a cuptorului; 10. Camera de evacuare a gazelor; 11. Multiciclon; 12. Exhaustor de gaze arse; 13. Rezervor de păcură; 14. Vagon transfercar; 15. Schip; 16. Pălnie de încărcare; 17. Dispozitiv de descărcare; 18. Conducta de aspiraţie a aburilor; 19. Pălnie de descărcare; 20. Transportor pentru evacuare; 21. Troliul schipului; 22. Clapă de reglare automată a admisiei pentru combustibil; 23. Clapă de reglare automată a temperaturii în camera de amestec.

Fig. 11. — Prăjitor de mare capacitate: Proiect IPROMET.

Gazele se introduc în zona de prăjire prin fante pe întreaga secţiune a acestei zone şi circulă în sens perpendicular pe coloana de minereu ce urmează a fi prăjit, trecînd apoi prin zona de preîncălzire în acelaşi fel de două ori şi părăsind cuptorul prin partea de sus a spinării centrale executată din zidărie refractară şi prevăzută cu fante pentru trecerea gazelor. Sub zona de prăjire, minereul ce coboară spre gurile de evacuare este intens răcit prin aerul ce trece, tot transversal, prin această zonă, care se foloseşte apoi pentru diluarea produselor de ardere la temperatura optimă pentru procesul de prăjire. Cuptorul descris mai sus prezintă două avantaje esenţiale:

1. Gazele trec prin minereu pe o secțiune largă cu o temperatură precis controlată și reglată și dă în consecință un produs de o calitate uniformă și optimă.

2. Se reduce înălțimea ce trebuie să străbată gazele prin straturile de minereu la mai puțin de jumătate din înălțimea totală a cuptorului, pe cînd la celalte tipuri de cuptoare gazele trebuie să învingă rezistența întregii coloane de minereu, ceea ce duce ori la consum mare de energie electrică, ori la productivitate mică a cuptorului. Deci acest tip de cuptor pe lîngă toate avantajele cuptoarelor de mare productivitate (mecanizarea totală, produs uniform de calitate superioară etc.), este și economic din punct de vedere energetic, consumînd pentru o tonă de produs numai un sfert din energia electrică consumată de alte tipuri de cuptoare de acest gen.

РЕШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОПРОСОВ, СВЯЗАННЫХ С УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ ПЕЧЕЙ, ОБЖИГАЮЩИХ ЖЕЛЕЗНУЮ И МАРГАНЦЕВУЮ РУДУ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Указывая на то, что в процессе обжигания концентрация металла в карбонатах железа и марганца заметно возрастает, автор описывает три основных типа обжигательных печей, в которых: 1) твердое топливо непосредственно смешивается с рудой, 2) газообразное горючее непосредственно смешивается с рудой и 3) газообразные продукты горения смешиваются с рудой.

Автор указывает недостатки печи 1-го типа и излагает результаты исследований, произведенных Энергетическим институтом Академии РНР с целью превращения этой печи в печь 2-го типа, в которой руда обжигается доменными газами, непосредственно пропускаемыми между кусками руды.

Преобразования, сделанные на основании вышеуказанных исследований, дали следующие результаты:

1. Увеличение призводительности печи на 400%.

2. Улучшение качества обжигаемой руды вследствие значительного уменьшения остаточного содержания CO_2.

Рассматривается, наконец, и обжигательная печь 3-го типа, причем излагается принцип нового типа печи этого рода, являющегося самым экономичным с энергетической точки зрения, так как в ней газы не проходят вертикально через всю колонну загруженной руды, а через широкие поперечные разделы, вследствие чего значительно уменьшается сопротивление в печи.

Этот последний тип печи поддается механизации, автоматической регулировке температуры и наряду с исключительно большой производительностью может давать однородный законченный продукт высокого качества.

ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. — Обжигание руды с угольной пылью.
Рис. 2. — Прибор для определения продолжительности сроков обжигания.
Рис. 3. — Определение влияния величины грануляции на продолжительность обжигания сидерита.

Рис. 4. — Определение влияния температуры на продолжительность обжигания сидерита.

Рис. 5. — Определение влияния частичного давления CO_2 на продолжительность обжигания сидерита.

Рис. 6. — Прибор для определения проницаемости.

Рис. 7. — Опыт определения проницаемости сидерита. Грануляция сидерита 20 — 50 мм.

Рис. 8. — Опыт определения проницаемости сидерита. Грануляция сидерита 50 — 100 мм.

Рис. 9. — Обжигательная печь, приспособленная для горения доменных газов.

Рис. 10. — Диаграмма характерных кривых, построенных при испытании обжигательной печи, приспособленной для горения доменных газов.

Рис. 11. — Обжигательная печь большой производительности по проекту ИПРОМЕТ.

SOLUTIONS ÉNERGÉTIQUES POUR L'AMÉLIORATION DES FOURS À GRILLER LES MINERAIS DE FER ET DE MANGANÈSE

(RÉSUMÉ)

Etant donné que, par grillage, la concentration en métal des carbonates de fer et de manganèse s'accroît sensiblement, on décrit les trois principaux types de fours à griller:

1. Mélange direct combustible solide — minerai.
2. Mélange direct combustible gazeux — minerai.
3. Mélange gaz brûlés — minerai.

On indique les déficiences du four type 1 et les études entreprises par l'Institut d'Energétique de l'Académie de la République Populaire Roumaine sur un pareil four, en vue de le transformer en four de type 2, c'est-à-dire grillant le minerai au moyen des gaz de fours introduits directement entre les blocs de minerai. Les transformations effectuées sur les données des études mentionnées ci-dessus ont abouti aux résultats suivants:

1. Accroissement de 400% de la productivité du four.
2. Amélioration de la qualité du minerai grillé par réduction sensible des restes CO_2.

On traite enfin aussi du type 3 de fours a griller, exposant les principes d'un nouveau type de four de ce genre, qui serait le plus économique au point de vue énergétique, les gaz ne traversant pas verticalement toute la colonne de minerai, mais par de larges sections transversales, ce qui réduit considérablement la résistance dans le four.

Ce dernier type de four se prête à la mécanisation, au réglage automatique de la température et peut donner, outre un rendement exceptionnellement élevé, un produit fini, uniforme, de qualité supérieure.

EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — Grillage du minerai avec du poussier de charbon.
Fig. 2. — Dispositif pour déterminer la durée du grillage.
Fig. 3. — Détermination de l'influence des dimensions de la granulation sur la durée du grillage de la sidérite.

Fig. 4. — Détermination de l'influence de la température sur la durée du grillage de la sidérite.

Fig. 5. — Détermination de l'influence de la pression partielle du CO_2 sur la durée du grillage de la sidérite.

Fig. 6. — Dispositif pour la détermination de la perméabilité.

Fig. 7. — Essais de détermination de la perméabilité sur la sidérite. Granulation de la sidérite: 20 à 50 mm.

Fig. 8. — Essais de détermination de la perméabilité de la sidérite. Granulation de la sidérite: 50 à 100 mm.

Fig. 9. — Four à griller modifié pour combustion des gaz de haut-fourneau.

Fig. 10. — Diagramme des courbes caractéristiques enregistrées à l'occasion des essais du four à griller à gaz de haut-fourneau.

Fig. 11. — Four à griller les minerais, de grande capacité. Projet IPROMET.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul IV, 1954

TERMOENERGETICĂ

PUTEREA ELECTRICĂ CE SE POATE OBŢINE ÎN GRUPURI DE TERMOFICARE CU CONTRAPRESIUNE

DE

I. A. BADEA

Dezvoltarea rapidă a termoficării în primul plan cincinal al R.P.R. pune noi şi variate probleme tehnicienilor noştri. Urmînd drumul luminos trasat de tehnica sovietică, se impune şi la noi rezolvarea problemelor pe care le ridică termoficarea prin adaptarea la condiţiile noastre specifice.

Pentru a se pune la îndemîna tehnicienilor un mijloc de rezolvare rapidă a unor probleme de termoficare, s-au întocmit o serie de nomograme şi tablouri, în care se poate citi rapid puterea ce se poate obţine în grupurile de termoficare cu contrapresiune. Scopul acestor nomograme şi tablouri este de a se reprezenta într-un mod simplu, clar şi precis, relaţiile între cantitatea de căldură cerută de consumatorul termic şi puterea obţinută în grupul de termoficare.

Consumatorii termici necesită, în procesul de fabricaţie, abur de presiuni diferite, impuse de temperatura cerută de natura procesului tehnologic. De asemenea, pentru încălzit şi ventilaţie se cere abur la presiuni mai scăzute. Numărul de prize ca şi presiunile obţinute la ieşirea din turbinele grupurilor de termoficare este limitat. Prin aceasta se îngreunează alegerea parametrilor unitari pentru presiunile la priză şi contrapresiunea la turbinele de termoficare, deoarece alegerea unor presiuni ridicate ale aburului conduce la micşorarea puterii electrice produse în grupul de termoficare. Preluarea directă de abur de la cazane prin reductor, sau folosirea transformatorilor de căldură (exemplu compresorul cu jet de abur) pentru obţinerea unei presiuni mai ridicate, cînd presiunea aburului la priză sau la ieşirea din turbină este inferioară celei cerute de consumatorul termic, va forma obiectul unui alt studiu.

Alegerea uneia din soluţii va fi impusă atît de tipurile normalizate de grupuri de termoficare de care se dispune, cît şi de condiţiile tehnico-economice.

I. ANALIZAREA ŞI CALCULUL UNEI SCHEME TERMICE SIMPLIFICATE A UNEI CENTRALE ECHIPATE CU UN GRUP DE TERMOFICARE CU CONTRAPRESIUNE

La stabilirea schemei termice simplificate a unei centrale de termoficare (CET)*), trebuie să se ţină seama, pe de o parte, de valorile necesarului de căldură şi energie electrică a consumatorilor, pe de altă parte, de tipurile grupurilor

*) CET = centrală de termoficare.

de termoficare cu turbine cu contrapresiune pură sau cu turbine cu condensaţie cu priză de care se dispune. Cazul grupurilor cu condensaţie cu priză se consideră echivalent cu suprapunerea a două turbine: o turbină cu contrapresiune ce prelucrează debitul de abur între parametrii iniţiali şi cei de la priză şi o turbină cu condensaţie pură, ce prelucrează debitul de abur intrat în condensator între parametrii aburului la intrarea în turbină şi cei la intrarea în condensator.

Alegerea pentru centrala de termoficare a unei scheme cu grupuri cu contrapresiune pură, sau cu condensaţie şi priză, nu face obiectul acestei lucrări. Această problemă de o mare importanţă, va fi tratată separat într-un alt cadru. Tot acolo se va insista şi asupra avantajelor pe care le oferă fiecare soluţie atît din punct de vedere tehnico-economic, cît şi din punctul de vedere al elasticităţii în exploatare

1. Stabilirea formulelor generale pentru determinarea puterii ce se poate obţine într-un grup de termoficare cu contrapresiune şi stabilirea indicilor de corecţie

Pentru stabilirea formulei generale de calcul a puterii obţinute în grupuri turbogeneratoare cu turbine cu contrapresiune s-a considerat că centrala de termoficare este echipată după schema simplificată din figura 1.

Pentru generalizare, s-a calculat puterea ce se poate obţine într-un grup cu contrapresiune, pentru cazul cînd se dă consumatorului un debit de abur de 1 t/h.

Deoarece aburul la ieşirea din turbină este în genere supraîncălzit cu mult peste temperatura de saturaţie, s-a considerat că va fi răcit prin injecţie de condensat. Astfel, din urmărirea figurii 1, se constată că atunci cînd la consumator se trimite o tonă de abur, se injectează pentru răcire $(1 - x)$ tone de condensat cu entalpia i'. În acest caz, pentru o tonă de abur trimis în fabricaţie se preia de la contrapresiunea turbinei numai x tone.

Alimentarea cu apă a cazanului se face cu condensatul recuperat din aburul trimis în fabricaţie, iar pierderile se completează cu apă de adaus epurată în prealabil.

Pentru asigurarea unei anumite temperaturi a apei la intrarea în cazan, cît şi pentru degazare, aceasta se preîncălzeşte cu abur preluat de la contrapresiunea turbinei, sau de la o priză a ei. În formula generală s-a presupus că preîncălzirea acesteia se face cu abur de la contrapresiune. Această cantitate de abur adăugată la debitul cerut în fabricaţie, măreşte debitul care trece prin turbină şi prin aceasta ridică puterea turbinei.

Puterea electrică debitată la bornele generatorului depinde de: debitul de abur trecut prin turbină, căderea entalpică, de randamentul termodinamic al turbinei, randamentul mecanic al grupului, randamentul angrenajului (cînd cuplarea între turbină şi generator se face prin angrenaj) şi randamentul generatorului.

Puterea electrică trimisă la consumator se obţine prin scăderea puterii consumate de serviciile interne ale centralei din puterea produsă la bornele generatorului.

Dintre serviciile interne a căror putere depinde direct de presiunea aburului în cazan trebuie menţionate pompele de apă de alimentare a cazanului.

În cele ce urmează se calculează următoarele:

— indicele de corecţie x care arată raportul dintre debitul de abur preluat de la contrapresiunea turbinei şi cel cerut de consumatorul termic;

— indicele de corecţie a care arată raportul dintre debitul de abur preluat de la contrapresiune pentru circuitul regenerativ al centralei şi cel cerut de consumatorul termic.

În calculele finale s-au făcut următoarele presupuneri:

— că întoarcerea condensatului se face la temperatura corespunzătoare presiunii de saturație a contrapresiunii respective;

— că temperatura apei de alimentare a cazanului este egală cu aceea corespunzătoare presiunii de saturație a contrapresiunii respective.

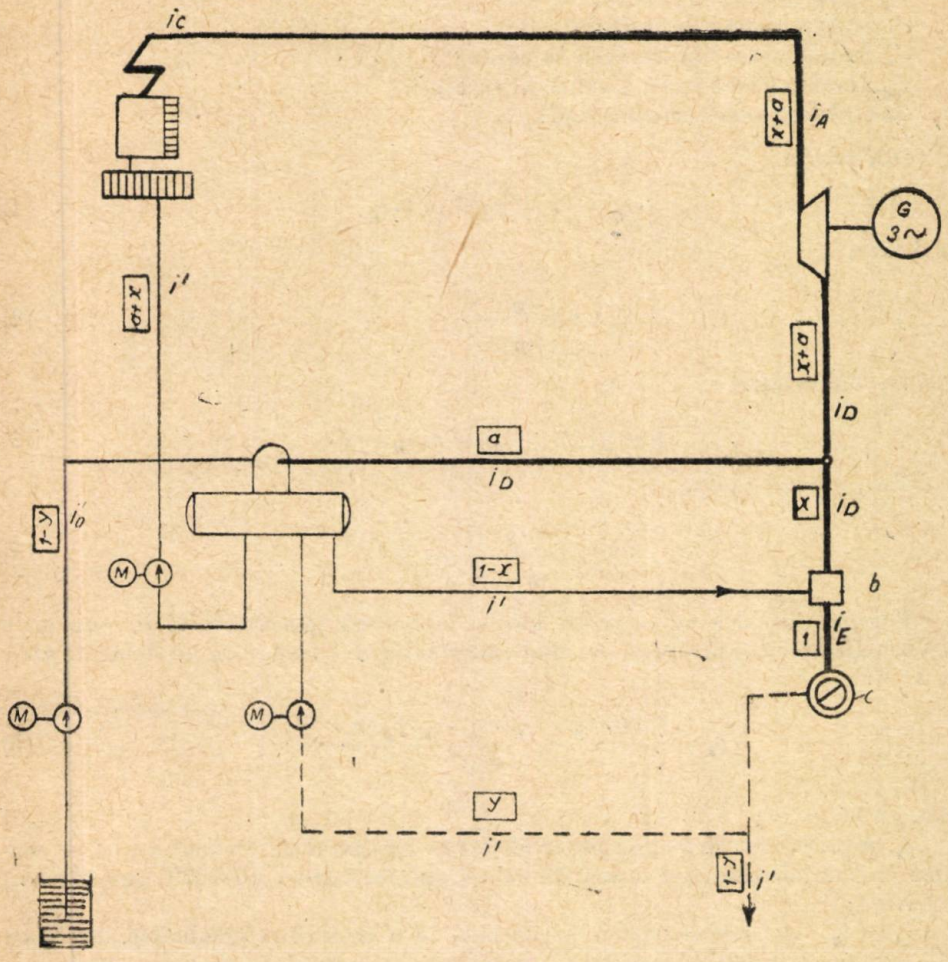


Fig. 1. — Schema termică simplificată a unei centrale de termoficare, echipată cu un grup cu contrapresiune, în ipoteza că se alimentează cazanul cu apă la temperatura de saturație a presiunii prizei respective, iar condensatul y se recuperează la aceeași temperatură:
c = consumator termic; b = răcitor de abur.

Pentru stabilirea formulei generale a puterii ce se poate obține într-un grup cu contrapresiune s-au întocmit bilanțurile termice.

În figura 1 s-a notat cu:

1, o tonă de abur la consumator la entalpia i_E;

i_A, entalpia aburului la intrarea în turbină;

i_E, entalpia aburului trimis la consumator, supraîncălzit cu 10—30°C;

i_D, entalpia aburului la ieşirea din turbină;
$1 - x$, debitul de apă injectat în răcitorul de abur;
$x + a$, debitul de abur trecut prin turbină;
y, debitul de condensat recuperat din aburul trimis în fabricaţie;
i', entalpia condensatului;
i'_0, entalpia apei de adaus;
i', entalpia apei de injecţie;
i', entalpia apei la intrarea în cazan;
η_{td}, randamentul termodinamic al turbinei.
Se stabilesc următoarele relaţii:

Din relaţia

$$x \cdot i_D + (1 - x)\ i' = 1 \cdot i_E, \tag{1}$$

se deduce

$$x = \frac{i_E - i'}{i_D - i'}. \tag{2}$$

Iar din relaţia

$$(1 - y)\ (i' - i'_0) = a\,(i_D - i'), \tag{3}$$

se deduce valoarea lui a

$$a = \frac{(1 - y)\ (i' - i'_0)}{i_D - i'} \tag{4}$$

Puterea electrică ce se poate obţine la bornele generatorului într-un grup de termoficare cu contrapresiune cînd consumatorul termic cere un debit de abur de 1t/h:

$$p_s = \frac{1000 \cdot (i_A - i_B) \cdot \eta_{td} \cdot \eta_m \cdot \eta_g\,(x + a)}{860} \tag{5}$$

unde s-a notat cu:

p_s, puterea specifică ce se poate obţine în agregatul de termoficare cînd consumatorul termic cere orar o tonă de abur (supraîncălzit cu 10—30°C sau saturat) în kWh/t;

$i_A - i_B$, căderea entalpică în turbină la o destindere adiabatică, egală cu diferenţa între entalpia aburului i_A la intrarea în turbină şi entalpia aburului i_B la presiunea de ieşire din turbină şi destinderea diabatică; în kcal/kg;

η_{td}, randamentul termodinamic al turbinei;

$\eta_m \cdot \eta_g$, produsul dintre randamentul mecanic al grupului şi randamentul generatorului;

$x + a$, debitul de abur trecut prin turbină cînd consumatornl termic cere orar o tonă de abur (supraîncălzit cu 10—30°C sau saturat) în t/h.

Puterea totală ce se poate obţine în agregatul de termoficare cînd consumatorul termic cere un debit de abur Q (supraîncălzit cu 10°—30°C sau saturat) este

$$P = Q \cdot p_s \tag{6}$$

unde s-a notat cu:

P, puterea totală ce se poate obține în grupul de termoficare în kW;

Q, debitul de abur (puțin supraîncălzit sau saturat) cerut de consumatorul termic în t/h;

p_s, puterea specifică ce se poate obține în agregatul de termoficare pentru un debit de abur (puțin supraîncălzit sau saturat) de 1t/h, cerut la consumator, în kWh/t.

2. Calculul puterii absorbite de pompele de apă de alimentare

Unul din consumatorii de energie importanți ce fac parte din serviciile interne ale unei centrale electrice și care sînt dependenți de presiunea cazanului de abur sînt pompele de alimentare cu apă.

Puterea cerută la cupla pompei de apă de alimentare se calculează după formula

$$N_p = \frac{1000 \cdot D \cdot H_{tot}}{3600 \cdot 102 \cdot \eta_p} \text{ (kW)}, \tag{7}$$

unde s-a notat cu

N_p, puterea cerută la cupla pompei în kW;

D, debitul de apă pompat de pompă în t/h;

H_{tot}, înălțimea manometrică totală de refulare a pompei, în metri coloană de apă;

η_p, randamentul pompei.

Calculul înălțimii de refulare a pompei se face după formula

$$H = \frac{10 \cdot Z}{\gamma_{med}}, \tag{8}$$

unde s-a notat cu

H, înălțimea manometrică totală în m coloană de apă;

Z, presiunea totală de refulare a pompei în kg/cm^2;

γ_{med}, greutatea specifică a apei pompate în t/m^3.

Puterea motorului sau a turbinei de antrenare este

$$N_m = \frac{N_p}{\eta_{angr}}, \tag{9}$$

unde s-a notat cu

N_m, puterea motorului la ax în kW;

N_p, puterea cerută la cupla pompei în kW;

η_{angr}, randamentul angrenajului, de care se ține seama în cazul transmisiei prin angrenaj de roți dințate, sau cu alt mijloc de multiplicare.

Puterea absorbită de motorul electric de antrenare este exprimată prin relația

$$N_{mabs} = \frac{N_m}{\eta_{mot}}, \tag{10}$$

unde s-a notat cu

$N_{m\,abs}$, puterea absorbită de motor, în kW;

N_m, puterea motorului la ax în kW;

η_{mot}, randamentul motorului.

Presiunea de refulare a pompei se calculează ţinînd seama de:
— presiunea statică în tamburul cazanului;
— pierderea de presiune în economizor şi în ventilele instalaţiei de alimentare;
— pierderea de presiune în regulatorul de alimentare;
— pierderile de presiune în conducta de alimentare şi în armăturile ei;
— suprapresiunea necesară apei, la intrarea în tamburul cazanului;
— înălţimea geometrică calculată ca diferenţă de nivel între axul pompei şi nivelul apei în tambur; din aceasta se scade înălţimea coloanei de apă de la rezervorul de alimentare la pompă.

Presiunea pompei de alimentare este în general cu circa 30% mai mare decît presiunea de regim a cazanului de abur.

II. STABILIREA VALORILOR RANDAMENTELOR TURBINEI, GENERATORILOR ŞI ALE ALTOR INSTALAŢII

Randamentele turbinei, generatorului, cazanului, ca şi ale restului instalaţiilor unei centrale depind de natura şi felul construcţiei acestora.

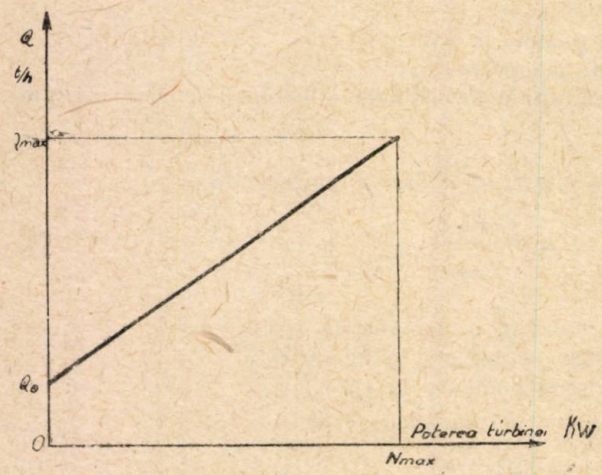


Fig. 2. — Diagrama de funcţionare a turbinei de contrapresiune: N_{max} = puterea maximă a turbinei; Q_{max} = debitul de abur trecut prin turbină la sarcină maximă; Q_0 = idem la mersul în gol.

Deoarece randamentul este dependent de sarcină, este necesar să se cunoască punctul pentru care acesta este garantat (sarcină optimă sau maximă). Pentru cazurile cînd nu se poate dispune de cifrele de randament garantate, se pot lua cu titlul informativ cifre uzuale realizate în construcţia acestor maşini şi instalaţii. Aceste cifre se referă în general la o funcţionare a instalaţiei respective la sarcină maximă.

În figura 2 se dă diagrama de funcţionare a unei turbine cu contrapresiune. Dacă se cunoaşte randamentul turbinei la sarcină maximă, cît şi pierderile la mersul în gol (15—25% din consumul la plină sarcină), se poate determina diagrama de funcţionare a turbinei şi deci debitele de abur consumate de aceasta la sarcini parţiale.

Ordinul de mărime al randamentelor diferitelor unităţi dintr-o centrală termoelectrică cu abur este dat în tabloul nr. 1 [1].

Randamentul mecanic şi al generatorului se poate lua după documentaţia sovietică [2], indicată în tabloul nr. 2.

Randamentul mecanic redus al turbinelor pînă la 2500 kW inclusiv, se datoreşte faptului că acestea sînt construite de obicei cu reductor de viteză montat între turbină şi generator.

Pentru cazanele de abur normalizate de construcţie sovietică se pot lua randamentele din tabloul nr. 3 [3].

Tabloul nr. 1

Randamentele instalațiilor unei centrale termoelectrice

Denumirea	Puterea unităților			Valori optime realizate
	mică	mijlocie	mare	
Randamentul termodinamic al turbinei	0,60—0,70	0,70—0,78	0,78—0,82	0,85
Randamentul mecanic	0,95—0,97	0,96—0,98	0,98—0,99	0,99
Randamentul generatorului	0,93—0,95	0,95—0,96	0,96—0,975	0,98
Randamentul conductelor de abur	0,96—0,98	0,97—0,99	0,99—0,995	0,995
Randamentul cazanului de abur (după combustibilul folosit)	0,65—0,75	0,70—0,80	0,78—0,85	0,92

Tabloul nr. 2

Randamentul mecanic al turbinelor și al generatorilor

Puterea în MW	1	2,5	4,0	6,0	12,0	25	50
Randamentul mecanic al turbinei	0,93	0,94	0,95	0,97	0,975	0,98	0,985
Randamentul generatorului	0,94	0,952	0,955	0,96	0,963	0,967	0,971
Randamentul generatorului înmulțit cu randamentul mecanic al turbinei	0,87	0,89	0,91	0,93	0,94	0,95	0,955

Tabloul nr. 3

Randamentul cazanelor de abur sovietice

Tipul cazanului	Debitul cazanului t/h	Parametrii aburului: presiunea ata	Parametrii aburului: temperatura °C	Combustibil	Arderea combustibilului pe:	Temperatura apei de alimentare a cazanului °C	Randamentul cazanului %
TSS—12	12	39	450	Lignit	Grătar lanț	150	85,1
TSS—12	12	39	450	Cărbune brun	idem	150	87,9
TSS—12	12	39	450	Turbă	idem	150	83,4
TS—20	20	39	450	Cărbune brun	Grătar lanț	150	84,3
TS—20	20	39	450	Turbă		150	84,9
TP—20	20	39	450	Lignit	Moară cu ciocane	150	87,7
TS—35	35	39	450	Antracit	Grătar lanț	150	82,0
TS—35	35	39	450	Turbă	idem	150	84,1
TP—35	35	39	450	Lignit	Moară cu ciocane	150	86,9
TP—35	35	39	450	Antracit	Moară cu	150	85,2
TP—35	35	39	450	Cărbune	tambur și bile	150	87,7
50—39—SU	50	39	450	Antracit	Grătar	150	83,9
50—39—SU	50	39	450	Turbă	lanț	150	83,8
50—39—Φ	50	39	450	Lignit	Moară cu ciocane	150	88,6
50—39—Φ	50	39	450	Antracit	Moară cu	150	85,3
50—39—Φ	50	39	450	Cărbune	tambur și bile	150	88,5
75—39—Φ_1	75	39	450	Cărbune brun	Moară cu ciocane	150	—
TP 170—1	170	100	510	Cărbune	Moară cu tambur și bile	215	87,4
TP—230	230	100	510	Turbă frezată antracit	Moară cu ciocane	220	84,7
PK—10	230	100	510	Antracit	Moară cu tambur și bile	220	86,75

III. FOLOSIREA TABLOURILOR ŞI NOMOGRAMELOR

În lucrarea de faţă se dau o serie de tablouri şi nomograme care indică direct puterea obţinută în grupurile de termoficare cu turbine cu contrapresiune. Folosirea acestora va permite determinarea rapidă a mărimii grupurilor unei centrale de termoficare cu contrapresiune.

1. Folosirea tablourilor

Pe baza formulei generale deduse în paragraful I, punctul 1, s-a calculat în tablourile anexate nr. I, II şi III puterea ce se poate obţine într-un grup de termoficare cu contrapresiune, cînd se trece prin turbină un debit de abur de 1 t/h. S-au întocmit trei tablouri pentru parametrii aburului la intrarea în turbină: 15 ata, 350°C; 35 ata, 435°C; 90 ata, 500°C şi pentru valori uzuale ale randamentului termodinamic al turbinei, ale randamentului generatorului şi randamentul mecanic al grupului.

În tablourile nr. IV şi V se dau indicii de corecţie x, ce se aplică valorilor din tablourile nr. II şi III, în ipoteza că se dă consumatorului abur saturat sau supraîncălzit cu 30°C. Deoarece aburul la ieşirea din turbină are o entalpie superioară celei cerute de consumator, s-a presupus că în cazul cînd se cere un debit de abur saturat sau supraîncălzit cu 30°C de 1 t/h, se trece prin turbină numai $1.x$ t/h abur, restul de $(1 - x)$ t/h urmînd să fie acoperit printr-o injecţie de condensat la o temperatură egală cu cea de saturaţie la presiunea respectivă. Pentru determinarea puterii ce se obţine într-un grup de termoficare cu contrapresiune pentru un debit de abur saturat sau supraîncălzit de 1 t/h cerut de consumator, se ia valoarea indicată în tablourile nr. II şi III şi se înmulţeşte cu coeficientul x de corecţie din tablourile nr. IV şi V.

În tablourile nr. VI şi VII se dau indicii de corecţie a, ce se aplică tablourilor nr. II şi III, pentru a se determina puterea suplimentară ce se obţine din aburul preluat de circuitul regenerativ al CET şi trecut prin turbină, în cazul cînd la consumator se cere un debit de abur de 1 t/h. Puterea suplimentară se obţine din înmulţirea valorii din tablourile nr. II şi III cu coeficientul de corecţie a din tablourile nr. VI şi VII.

Pentru determinarea puterii ce se obţine într-un grup de termoficare cu contrapresiune, ţinînd seama simultan de coeficienţii de corecţie x şi a calculaţi în tablourile nr. IV, V, VI şi VII, se înmulţesc valorile din tablourile nr. II şi III cu suma celor doi coeficienţi $x + a$.

2. Folosirea nomogramelor

Pentru calculul puterii în contrapresiune s-au construit nomogramele 1 şi 2,3 anexate, pentru parametrii aburului la intrarea în turbină: 15 ata, 3,50°C; 35 ata, 435°C; 90 ata, 500°C pentru valori uzuale ale randamentului termodinamic al turbinei, randamentului generatorului şi randamentul mecanic al grupului.

IV. APLICAŢII

Pentru alegerea puterii şi numărului grupurilor de termoficare cu contrapresiune pentru echiparea unei centrale de termoficare, este indicat să se stabilească în prealabil:

a) Sarcinile termice pentru încălzirea clădirilor și alimentarea consumatorilor tehnologici.

b) Curbele de variație a necesarului termic cerut de consumatori, pentru o zi medie de vară și iarnă.

c) Curba clasată anuală a necesarului termic pentru încălzire și fabricație.

d) Puterea maximă ce se poate obține în contrapresiune, dacă tot aburul cerut de consumator este trecut prin turbină și nu se trece nimic prin reductor.

e) Cantitatea de abur ce rămîne a fi preluată prin reductor.

f) Determinarea numărului și puterii grupurilor generatoare.

Primele trei puncte se stabilesc în colaborare cu inginerul tehnolog și cel care se ocupă cu încălzirea clădirilor; punctul *d* se stabilește cu ajutorul nomogramelor sau tablourilor din această lucrare, iar punctul *e* și *f* se rezolvă în funcție de factorii tehnico-economici, și vor face obiectul unei alte lucrări.

1. Tratarea numerică a unui exemplu

O industrie necesită în procesul de fabricație un debit constant de abur supraîncălzit cu 30°C, de 60 t/h la presiunea de 4 ata la colectorul centralei. Se consideră că debitul pentru fabricație este constant, cu o utilizare anuală de 8 000 h. Recuperarea condensatului se face la temperatura de saturație în proporție de 80%.

Se cere să se determine puterea ce se obține în contrapresiune, din aburul ce trece prin turbină. Se consideră că fabrica este interconectată electric la sistemul energetic, unde se poate debita surplusul de putere, sau prelua putere în caz de revizie a grupului.

Pentru aceasta se întocmește schema termică principială și se determină puterea cu ajutorul tablourilor sau a nomogramelor, pentru mai multe soluții, în funcție de parametrii aburului la intrarea în turbină.

Tabloul nr. 4

Exemple de calcul

Coloana	Denumire	Unitatea	Parametrii aburului la intrarea în turbină	
			35 ata 435 °C	90 ata 500°C
1	Tablouri folosite		II, IV și VI	III, V și VII
2	Puterea pentru un debit de abur de 1 t/h trecut prin turbină (tablourile nr. I, II și III) .	kWh/t	100,800	140,300
3	Indice de corecție x (tablourile nr. IV și V) .	—	0,954	0,981
4	Indicele de corecție a (tablourile nr. VI și VII)	—	0,047	0,046
5	$(x + a)$	—	1,001	1,027
6	Puterea ce se obține dacă se trece prin turbină 60 t/h (valoare rînd 2 × 60)	kW	6050	8460
7	Puterea ce se obține dacă se dă la consumator 60 t/h abur supraîncălzit cu 30°C (valoare rînd 6 × valoare rînd 3)	kW	5780	8300
8	Surplusul de putere ce se obține din aburul cerut de circuitul regenerativ și trecut prin turbină	kW	270	400
9	Puterea obținută în grup ținînd seama de corecția $(x + a)$	kW	6050	8700

Tabloul nr. IV

Indicele de corecție x ce se aplică puterii ce se poate obține într-un grup de termoficare cu contrapresiune (tabloul nr. II) cînd la consumator se cere 1 t abur/h saturat sau supraîncălzit cu 30°C

Valoarea indicelui de corecție x	Randamentul termodinamic al turbinei	Parametrii aburului la intrare în turbină: 35 ata, 435°C Presiunea aburului la ieșirea din turbină în ata:												
	η_{td}	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	15	17
Pentru cazul cînd la consumator se cere *abur saturat*	0,60	0,917	0,906	0,898	0,891	0,884	0,879	0,874	0,869	0,863	0,859	0,851	0,843	0,836
	0,62	0,922	0,911	0,902	0,895	0,888	0,882	0,877	0,841	0,866	0,862	0,853	0,845	0,837
	0,64	0,927	0,915	0,906	0,898	0,891	0,885	0,880	0,874	0,869	0,864	0,855	0,847	0,839
	0,68	0,938	0,925	0,915	0,906	0,898	0,891	0,886	0,880	0,874	0,869	0,859	0,850	0,842
	0,72	0,949	0,934	0,923	0,914	0,906	0,898	0,892	0,885	0,879	0,874	0,863	0,854	0,845
	0,76	0,960	0,944	0,932	0,922	0,913	0,905	0,898	0,891	0,884	0,879	0,867	0,857	0,848
	0,80	0,971	0,953	0,941	0,930	0,920	0,912	0,904	0,897	0,890	0,884	0,872	0,861	0,851
	0,84	0,982	0,964	0,950	0,938	0,927	0,918	0,910	0,903	0,895	0,889	0,876	0,865	0,854
Pentru cazul cînd la consumator se cere abur supraîncălzit cu 30°C	0,60	0,945	0,934	0,927	0,921	0,915	0,909	0,905	0,900	0,995	0,892	0,884	0,877	0,870
	0,62	0,950	0,939	0,932	0,925	0,918	0,912	0,908	0,903	0,898	0,894	0,887	0,879	0,872
	0,64	0,955	0,944	0,936	0,929	0,922	0,916	0,911	0,906	0,901	0,897	0,889	0,881	0,873
	0,68	0,966	0,953	0,945	0,937	0,929	0,022	0,917	0,912	0,907	0,902	0,893	0,884	0,876
	0,72	0,977	0,963	0,954	0,945	0,936	0,929	0,924	0,917	0,912	0,907	0,897	0,888	0,880
	0,76	0,988	0,973	0,963	0,953	0,944	0,936	0,930	0,923	0,917	0,912	0,901	0,892	0,883
	0,80	1,000	0,983	0,972	0,961	0,951	0,943	0,946	0,929	0,922	0,917	0,906	0,895	0,886
	0,84	1,012	0,993	0,981	0,970	0,959	0,950	0,953	0,936	0,928	0,922	0,911	0,899	0,890

Observație: Puterea ce se poate obține într-un grup cu contrapresiune pentru o tonă de abur saturat/h cerut de consumator se determină din produsul puterii obținute pentru o tonă de abur/h trecută prin turbină (din tabloul nr. II) cu coeficientul x de corecție din acest tablou.

Tabloul nr. I

Puterea în kW ce se poate obține într-un grup de termoficare cu contrapresiune cînd se trece prin turbină: 1 tonă abur/h

Randamentul mecanic × randamentul generatorului $\eta_m \cdot \eta_g$	Randamentul termodinamic al turbinei η_{td}	Parametrii aburului la intrarea în turbină: 15 ata, 350°C Presiunea aburului la ieşirea din turbină în ata:									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,87	0,60	65,2	54,3	46,1	39,1	33,3	28,2	23,6	19,4	15,4	12,1
	0,62	67,4	56,1	47,7	40,4	34,4	29,1	24,4	20,0	15,9	12,5
	0,64	69,6	57,9	49,2	41,7	35,5	30,1	25,2	20,7	16,4	12,9
	0,66	71,8	59,7	50,8	43,0	36,6	31,0	26,0	21,3	16,9	13,3
	0,68	73,9	61,5	52,3	44,3	37,7	31,9	26,8	21,9	17,4	13,7
	0,70	76,1	63,3	53,8	45,6	38,8	32,9	27,6	22,6	18,0	14,1
	0,72	78,3	65,1	55,4	46,9	40,0	33,8	28,4	23,2	18,5	14,5
	0,74	80,4	66,9	56,9	48,2	41,1	34,8	29,2	23,9	19,0	14,9
	0,76	82,6	68,7	58,4	49,5	42,2	35,7	30,0	24,5	19,5	15,3
	0,78	84,8	70,6	60,0	50,8	43,3	36,6	30,8	25,2	20,0	15,7
	0,80	87,0	72,4	61,5	52,1	44,4	37,6	31,6	25,8	20,5	16,1
	0,82	89,1	74,2	63,1	53,4	45,5	38,5	32,4	26,5	21,0	16,5
	0,84	91,3	76,0	64,6	54,7	46,6	39,5	33,2	27,1	21,6	16,9
0,89	0,60	66,8	55,5	47,1	40,0	34,1	28,3	24,2	19,8	15,8	12,3
	0,62	69,0	57,4	48,7	41,3	35,2	29,8	25,0	20,5	16,3	12,7
	0,64	71,2	59,2	50,3	42,7	36,3	30,7	25,8	21,1	16,8	13,1
	0,66	73,4	61,1	51,9	44,0	37,5	31,7	26,6	21,8	17,3	13,5
	0,68	75,7	62,9	53,5	45,3	38,6	32,7	27,4	22,4	17,8	14,0
	0,70	77,9	64,8	55,1	46,6	39,7	33,6	28,2	23,1	18,4	14,4
	0,72	80,1	66,6	56,7	48,0	40,9	34,6	29,0	23,8	18,9	14,8
	0,74	82,3	68,5	58,2	49,3	42,0	35,6	29,8	24,4	19,4	15,2
	0,76	84,5	70,3	59,8	50,6	43,1	36,5	30,6	25,1	19,9	15,6
	0,78	86,8	72,2	61,4	52,0	44,3	37,5	31,4	25,8	20,5	16,0
	0,80	89,0	74,0	62,9	53,3	45,4	38,4	32,2	26,4	21,0	16,4
	0,82	91,2	75,9	64,5	54,7	46,6	39,4	33,1	27,1	21,5	16,8
	0,84	93,4	77,7	66,1	56,0	47,7	40,3	33,9	27,7	22,0	17,2
0,91	0,60	68,2	56,8	48,3	40,9	34,8	29,5	24,7	20,2	16,1	12,1
	0,62	70,5	58,7	49,9	42,3	36,0	30,5	25,6	20,9	16,6	12,5
	0,64	72,8	60,5	51,5	43,6	37,2	31,4	26,4	21,6	17,2	12,9
	0,66	75,1	62,5	53,1	45,0	38,3	32,4	27,2	22,3	17,7	13,3
	0,68	77,4	64,4	54,7	46,3	39,5	33,4	28,0	23,0	18,3	13,7
	0,70	79,6	66,2	56,3	47,7	40,6	34,4	28,8	23,6	18,8	14,1
	0,72	81,9	68,1	57,9	49,1	41,8	35,4	29,7	24,3	19,3	14,5
	0,74	82,2	70,0	59,5	50,4	42,9	36,4	30,5	25,0	19,9	15,0
	0,76	86,5	71,9	61,1	51,8	44,1	37,3	31,3	25,7	20,4	15,4
	0,78	88,7	73,8	62,7	53,2	45,3	38,3	32,1	26,3	20,9	15,8
	0,80	91,0	75,7	64,3	54,6	46,4	39,3	33,0	27,0	21,5	16,2
	0,82	93,3	77,6	65,9	55,9	47,6	40,3	33,8	27,7	22,0	16,6
	0,84	95,6	79,5	67,6	57,2	48,8	41,3	34,6	28,4	22,6	17,0
0,93	0,60	69,7	58,0	49,3	42,2	35,6	30,1	25,3	20,7	16,5	12,9
	0,62	72,1	60,0	51,0	43,6	36,8	31,1	26,1	21,4	17,0	13,3
	0,64	74,4	61,9	52,6	45,1	38,0	32,1	27,0	22,1	17,6	13,7
	0,66	76,7	63,9	54,3	46,5	39,2	33,1	27,8	22,8	18,1	14,2
	0,68	79,0	65,8	55,9	47,9	40,3	34,1	28,6	23,5	18,7	14,6
	0,70	81,4	67,7	57,5	49,3	41,5	35,1	29,5	24,2	19,2	15,0
	0,72	83,7	69,6	59,2	50,7	42,7	36,1	30,3	24,8	19,7	15,5
	0,74	86,0	71,6	60,8	52,1	43,9	37,2	31,2	25,5	20,3	15,9
	0,76	88,3	73,5	62,5	53,5	45,1	38,2	32,0	26,2	20,8	16,3
	0,78	90,7	75,4	64,1	54,9	46,3	39,2	32,8	26,9	21,4	16,8
	0,80	93,0	77,4	65,8	56,3	47,5	40,2	33,7	27,6	21,9	17,2
	0,82	95,3	79,3	67,4	57,7	48,6	41,2	34,5	28,3	22,5	17,6
	0,84	97,6	81,2	69,1	59,1	49,8	42,2	35,4	29,0	23,0	18,0
0,94	0,60	70,5	58,7	49,8	42,2	36,0	30,5	25,5	20,9	16,6	13,0
	0,62	72,8	60,6	51,5	43,6	37,2	31,5	26,4	21,6	17,2	13,4
	0,64	75,2	62,6	53,2	45,1	38,4	32,5	27,2	22,3	17,7	13,8
	0,66	77,5	64,5	54,8	46,5	39,6	33,5	28,1	23,0	18,3	14,3
	0,68	79,9	66,5	56,5	47,9	40,8	34,5	28,9	23,7	18,8	14,8
	0,70	82,2	68,4	58,2	49,3	42,0	35,5	29,8	24,4	19,4	15,2
	0,72	84,6	70,4	59,8	50,7	43,2	36,5	30,6	25,1	19,9	15,6
	0,74	86,9	72,3	61,5	52,1	44,4	37,6	31,5	25,8	20,5	16,1
	0,76	89,3	74,3	63,1	53,5	45,6	38,6	32,3	26,5	21,1	16,5
	0,78	91,6	76,2	64,8	54,9	46,8	39,6	33,2	27,2	21,6	16,9
	0,80	94,0	78,2	66,5	56,3	48,0	40,6	34,0	27,9	22,2	17,4
	0,82	96,3	80,2	68,1	57,7	49,2	41,6	34,9	28,6	22,7	17,8
	0,84	98,7	82,1	69,8	59,1	50,4	42,6	35,7	29,3	23,3	18,2
0,95	0,60	71,2	59,3	50,4	42,7	36,4	30,8	26,0	21,1	16,8	13,2
	0,62	73,6	61,3	52,1	44,1	37,6	31,8	26,8	21,8	17,4	13,6
	0,64	76,0	63,2	53,7	45,5	38,8	32,8	27,6	22,5	17,9	14,0
	0,66	78,4	65,2	55,4	47,0	40,0	33,8	28,4	23,3	18,5	14,5
	0,68	80,7	67,2	57,1	48,4	41,2	34,9	29,3	24,0	19,1	15,0
	0,70	83,1	69,2	58,8	49,8	42,4	35,9	30,1	24,7	19,6	15,4
	0,72	85,5	71,1	60,5	51,2	43,6	36,9	31,0	25,4	20,2	15,8
	0,74	87,9	73,1	62,1	52,6	44,8	37,9	31,8	26,1	20,7	16,2
	0,76	90,2	75,1	63,8	54,1	46,1	39,0	32,7	26,8	21,3	16,7
	0,78	92,6	77,1	65,5	55,5	47,3	40,0	33,6	27,5	21,8	17,1
	0,80	95,0	79,0	67,2	56,9	48,5	41,0	34,4	28,2	22,4	17,5
	0,82	97,4	81,0	68,9	58,3	49,7	42,0	35,3	28,9	23,0	18,0
	0,84	99,8	83,0	70,5	59,7	50,9	43,1	36,1	29,6	23,5	18,4
0,955	0,60	71,6	59,6	50,6	42,9	36,6	31,0	26,0	21,3	16,9	13,2
	0,62	74,0	61,6	52,3	44,3	37,8	32,0	26,8	22,0	17,5	13,7
	0,64	76,4	63,6	54,0	45,8	39,0	33,0	27,7	22,7	18,0	14,1
	0,66	78,8	65,5	55,7	47,2	40,2	34,0	28,5	23,4	18,6	14,5
	0,68	81,2	67,5	57,4	48,6	41,4	35,0	29,4	24,1	19,1	15,0
	0,70	83,6	69,5	59,1	50,1	42,6	36,0	30,3	24,8	19,7	15,4
	0,72	86,0	71,5	60,8	51,5	43,9	37,1	31,1	25,5	20,3	15,9
	0,74	88,3	73,5	62,5	52,9	45,1	38,2	32,0	26,2	20,8	16,3
	0,76	90,7	75,5	64,2	54,4	46,3	39,2	32,9	26,9	21,4	16,8
	0,78	93,1	77,5	65,8	55,8	47,5	40,2	33,7	27,6	22,0	17,2
	0,80	95,5	79,5	67,5	57,2	48,7	41,2	34,6	28,3	22,5	17,6
	0,82	97,9	81,4	69,2	58,7	50,0	42,3	35,5	29,0	23,1	18,1
	0,84	100,3	83,4	70,9	60,1	51,2	43,3	36,3	29,7	23,7	18,5
1,00	0,60	75,0	62,4	53,0	44,9	38,3	32,4	27,2	22,3	17,7	13,9
	0,62	77,5	64,5	54,8	46,4	39,5	33,5	28,1	23,0	18,3	14,3
	0,64	80,0	66,6	56,6	47,9	40,8	34,6	29,0	23,7	18,9	14,8
	0,66	82,5	68,6	58,3	49,4	42,1	35,6	29,9	24,5	19,5	15,3
	0,68	85,0	70,7	60,1	50,9	43,4	36,7	30,8	25,2	20,1	15,7
	0,70	87,5	72,8	61,9	52,4	44,7	37,8	31,7	26,0	20,6	16,2
	0,72	90,0	74,9	63,6	53,9	46,0	38,9	32,6	26,7	21,2	16,6
	0,74	92,5	77,0	65,4	55,4	47,2	40,0	33,5	27,4	21,8	17,1
	0,76	95,0	79,0	67,2	56,9	48,5	41,0	34,4	28,2	22,4	17,5
	0,78	97,5	81,1	68,9	58,4	49,8	42,1	35,3	28,9	23,0	18,0
	0,80	100,0	83,2	70,7	59,9	51,0	43,2	36,2	29,7	23,6	18,5
	0,82	102,5	85,3	72,5	61,4	52,3	44,3	37,1	30,4	24,2	18,9
	0,84	105,0	87,4	74,3	62,9	53,6	45,4	38,0	31,2	24,8	19,4

Tabloul nr. II

Puterea în kW ce se poate obține într-un grup de termoficare cu contrapresiune cînd se trece prin turbină: 1 tonă abur/oră

Randamentul mecanic × randamentul generator $\eta_m \cdot \eta_g$	Randamentul termodinamic al turbinei η_{td}	Parametrii aburului la intrarea în turbină: 35 ata, 435°C Presiunea aburului la ieşirea din turbină în ata:												
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	15	17
0,87	0,60	96,6	85,6	77,8	71,5	66,3	61,6	57,4	53,2	49,8	46,7	40,7	35,4	30,7
	0,62	99,8	88,5	80,4	73,9	68,5	63,6	59,3	55,0	51,5	48,3	42,0	36,5	31,7
	0,64	103,0	91,3	83,0	76,3	70,7	65,7	61,2	56,8	53,2	49,8	43,4	37,7	32,7
	0,66	106,2	94,2	85,5	78,7	72,9	67,7	63,2	58,6	54,8	51,4	44,8	38,9	33,8
	0,68	109,4	97,0	88,2	81,0	75,1	69,8	65,1	60,3	56,5	52,9	46,1	40,5	34,8
	0,70	112,7	99,9	90,7	83,4	77,3	71,9	67,0	62,1	58,1	54,5	47,5	41,2	35,8
	0,72	115,9	102,7	93,3	85,8	79,5	73,9	69,0	63,9	59,8	56,1	48,8	42,4	36,8
	0,74	119,1	105,6	95,9	88,2	81,8	76,0	70,8	65,7	61,5	57,6	50,2	43,6	37,8
	0,76	122,2	108,4	98,5	90,6	84,0	78,0	72,7	67,4	63,1	59,2	51,6	44,8	38,9
	0,78	125,5	111,3	101,1	93,0	86,2	80,0	74,8	69,2	64,8	60,7	52,9	45,9	40,0
	0,80	128,8	114,1	103,7	95,4	88,4	82,1	76,6	70,9	66,5	62,3	54,3	47,1	40,9
	0,82	132,0	117,0	106,3	97,8	90,6	84,1	78,5	72,8	68,1	63,8	55,6	48,3	41,9
	0,84	135,2	119,8	108,8	100,1	93,8	86,2	80,4	74,5	69,8	65,4	57,0	49,5	43,0
0,89	0,60	98,8	87,6	70,6	73,2	67,8	63,0	58,7	54,5	51,0	47,8	41,6	36,1	31,4
	0,62	102,1	90,5	73,0	75,6	70,0	65,1	60,7	56,3	52,7	49,3	43,0	37,3	32,4
	0,64	105,4	93,4	75,3	78,0	72,3	67,2	62,6	58,0	54,4	51,0	44,4	38,6	33,5
	0,66	108,7	96,3	77,7	80,5	74,6	69,3	64,6	59,9	56,1	52,6	45,8	39,8	34,5
	0,68	112,0	99,2	80,0	83,0	76,9	71,4	66,6	61,7	58,0	54,2	47,2	41,0	35,6
	0,70	115,2	102,2	82,4	85,4	79,1	73,5	68,5	63,5	59,5	55,8	48,6	42,2	36,6
	0,72	118,5	105,0	84,7	87,8	81,4	75,6	70,5	65,4	61,2	57,3	50,0	43,4	37,7
	0,74	121,8	108,0	87,1	90,2	83,6	77,7	72,4	67,2	62,9	58,9	51,3	44,6	38,7
	0,76	125,1	111,0	89,4	92,7	85,9	79,8	74,4	69,0	64,6	60,5	52,7	45,8	39,8
	0,78	128,4	113,8	91,8	95,1	88,2	81,9	76,4	70,8	66,3	62,1	54,1	47,0	40,8
	0,80	131,7	116,8	94,2	97,5	90,4	84,0	78,3	72,6	68,0	63,7	55,5	48,2	41,9
	0,82	135,0	119,7	96,5	100,0	92,7	86,1	80,3	74,4	69,7	65,3	56,9	49,4	42,9
	0,84	138,3	122,6	98,9	102,4	94,9	88,2	82,2	76,2	71,4	66,9	58,3	50,6	43,9
0,91	0,60	101,0	89,5	81,3	74,8	69,3	64,4	60,1	55,7	51,1	48,9	42,6	41,0	32,1
	0,62	104,4	92,5	84,1	77,3	71,6	66,6	62,1	57,5	53,9	50,5	44,0	42,4	33,2
	0,64	107,7	95,5	86,8	79,8	74,0	68,7	64,1	59,4	55,6	52,1	45,4	43,8	34,2
	0,66	111,1	98,5	89,5	82,3	76,3	70,9	66,1	61,3	57,3	53,7	46,8	45,1	35,3
	0,68	114,5	101,5	92,2	84,8	78,6	73,0	68,1	63,1	59,1	55,4	48,2	46,5	36,4
	0,70	117,8	104,5	95,0	87,3	80,9	75,1	70,1	65,0	60,8	57,0	49,7	48,9	37,4
	0,72	121,2	107,4	97,6	89,8	83,2	77,3	72,1	66,8	62,6	58,6	51,1	49,2	38,5
	0,74	124,6	110,4	100,3	92,2	85,5	79,5	74,1	68,7	64,3	60,3	52,5	50,6	39,6
	0,76	127,9	113,4	103,1	94,7	87,8	81,6	76,1	70,5	66,0	61,9	53,9	52,0	40,7
	0,78	131,3	116,4	105,8	97,2	90,1	83,7	78,1	72,4	67,8	63,5	55,3	53,3	41,7
	0,80	134,7	118,4	108,5	99,7	92,4	85,9	80,1	74,2	69,5	65,1	56,8	54,7	42,8
	0,82	138,0	122,4	111,2	102,2	94,8	88,0	82,1	76,1	71,2	66,8	58,2	56,0	43,9
	0,84	141,4	125,4	113,9	104,7	97,1	90,2	84,1	78,0	73,0	68,4	59,6	57,4	44,9
0,93	0,60	103,2	91,5	83,1	76,4	70,9	65,8	61,4	56,9	53,3	49,9	43,5	37,8	32,4
	0,62	106,7	94,6	86,0	79,0	73,2	68,0	63,4	58,8	55,1	51,6	45,0	39,0	33,4
	0,64	110,1	97,6	88,7	81,5	75,6	70,2	65,5	60,7	56,8	53,3	46,4	40,3	34,5
	0,66	113,5	100,7	91,4	84,0	77,9	72,4	67,5	62,6	58,6	54,9	47,9	41,5	35,6
	0,68	117,0	103,7	94,2	86,6	80,3	74,6	69,6	64,5	60,4	56,6	49,3	42,8	36,7
	0,70	120,4	106,8	97,0	89,1	82,7	76,8	71,6	66,4	62,2	58,3	50,8	44,0	37,7
	0,72	123,9	109,8	99,8	91,7	85,7	79,0	73,6	68,3	63,9	59,9	52,2	45,3	38,8
	0,74	127,3	112,9	102,5	94,3	87,4	81,2	75,7	70,2	65,7	61,6	53,7	46,6	39,9
	0,76	130,7	115,9	105,3	96,8	89,8	83,4	77,7	72,1	67,5	63,2	55,1	47,8	41,0
	0,78	134,2	119,0	108,1	99,4	92,1	85,6	79,8	74,0	69,3	64,9	56,6	49,1	42,1
	0,80	137,6	122,0	110,8	101,9	94,5	87,8	81,8	75,9	71,0	66,6	58,0	50,4	43,1
	0,82	141,1	125,1	113,6	104,5	96,8	90,0	83,9	77,8	72,8	68,2	59,5	51,6	44,2
	0,84	144,5	128,1	116,4	107,0	99,2	92,1	85,9	79,7	74,6	69,9	60,9	52,9	45,3
0,94	0,60	104,3	92,5	84,0	77,3	71,6	66,5	62,0	57,5	53,9	50,5	44,0	38,2	33,2
	0,62	107,8	95,6	86,8	79,8	74,0	68,8	64,1	59,4	55,6	52,1	45,4	39,4	34,3
	0,64	111,3	98,7	89,6	82,4	76,4	71,0	66,2	61,4	57,4	53,8	46,9	40,7	35,4
	0,66	114,8	101,7	92,4	85,0	78,8	73,2	68,2	63,3	59,2	55,5	48,4	42,0	36,5
	0,68	118,2	104,8	95,2	87,6	81,1	75,4	70,3	65,2	61,0	57,2	49,8	43,3	37,6
	0,70	121,7	108,0	98,0	90,1	83,6	77,6	72,3	67,1	62,8	58,9	51,3	44,4	38,7
	0,72	125,3	111,0	100,8	92,7	85,9	79,9	74,4	69,0	64,6	60,6	52,8	45,8	39,8
	0,74	128,7	114,1	103,6	95,3	88,3	82,1	76,5	70,9	66,4	62,2	54,2	47,1	40,9
	0,76	132,2	117,2	106,4	97,9	90,7	84,3	78,6	72,9	68,2	63,9	55,7	48,4	42,0
	0,78	135,6	120,2	109,2	100,4	93,1	86,5	80,6	74,8	70,0	65,6	57,2	49,6	43,1
	0,80	139,1	123,3	112,0	103,0	95,5	88,7	82,7	76,7	71,8	67,3	58,6	50,9	44,2
	0,82	142,6	126,4	114,8	105,6	97,9	91,0	84,8	78,6	73,6	69,0	60,1	52,2	45,3
	0,84	146,1	129,5	117,6	108,2	100,3	93,2	86,8	80,8	75,4	70,9	67,6	53,4	46,4
0,95	0,60	105,4	93,5	84,9	78,1	72,4	67,3	62,7	58,1	54,4	51,0	44,5	38,6	33,5
	0,62	109,0	96,6	87,8	80,7	74,8	69,5	64,8	60,1	56,2	52,7	45,9	39,9	34,6
	0,64	112,5	99,7	90,6	83,3	77,2	71,7	66,9	62,0	58,1	54,4	47,4	41,2	35,7
	0,66	116,0	102,8	93,4	85,9	79,6	74,0	69,0	64,0	59,9	56,1	48,9	42,4	36,9
	0,68	119,5	105,9	96,2	88,5	82,0	76,2	71,1	65,8	61,7	57,8	50,4	43,7	38,0
	0,70	123,0	109,1	99,1	91,1	84,4	78,5	73,1	67,8	63,5	59,5	51,9	45,0	39,1
	0,72	126,5	112,2	106,9	93,7	86,9	80,7	75,2	69,8	65,3	61,2	53,3	46,3	40,2
	0,74	130,0	115,3	104,7	96,3	89,3	82,9	77,3	71,7	67,1	62,9	54,8	47,6	41,3
	0,76	133,6	118,4	107,6	98,9	91,7	85,2	79,4	73,6	69,0	64,6	56,3	48,9	42,4
	0,78	137,1	121,5	110,4	101,5	94,1	87,4	81,5	75,6	70,8	66,3	57,8	50,2	43,6
	0,80	140,6	124,6	113,2	104,1	96,5	84,7	83,6	77,5	72,6	68,0	59,3	51,4	44,7
	0,82	144,1	127,7	116,1	106,7	98,9	91,9	85,7	79,4	74,4	69,7	60,8	52,7	45,8
	0,84	147,6	130,9	118,9	109,3	101,3	94,1	87,8	81,4	76,2	71,4	62,2	54,0	46,9
0,955	0,60	106,0	94,0	85,3	78,5	72,8	67,6	63,0	58,4	54,7	50,1	44,7	38,8	33,7
	0,62	109,5	97,1	88,2	81,1	75,2	69,9	65,1	60,4	56,5	51,8	46,2	40,1	34,8
	0,64	113,1	100,2	91,0	83,7	77,6	72,1	67,2	62,3	58,4	53,5	47,7	41,4	35,9
	0,66	116,6	103,1	93,9	86,3	80,0	74,4	69,3	64,3	60,2	55,1	49,2	42,7	37,1
	0,68	120,1	106,5	96,7	89,0	82,5	76,6	71,4	66,2	62,0	56,8	50,6	44,0	38,2
	0,70	123,7	109,6	99,6	91,6	84,9	78,9	73,5	68,2	63,4	58,5	52,1	45,2	39,3
	0,72	127,2	112,8	102,4	94,2	87,3	81,1	75,6	70,1	65,7	60,2	53,6	46,5	40,4
	0,74	130,7	115,9	105,2	96,8	89,7	83,4	77,7	72,1	67,5	61,8	55,1	47,8	41,5
	0,76	134,3	119,0	108,1	99,4	92,2	85,6	79,8	74,0	69,3	63,5	56,6	49,1	42,7
	0,78	137,8	122,2	110,9	102,0	94,6	87,9	81,9	76,0	71,1	65,2	58,1	50,4	43,8
	0,80	141,3	125,3	113,8	104 7	97,0	90,1	84,0	77,9	73,0	66,8	59,6	51,7	44,9
	0,82	144,9	128,4	116,6	107,3	99,4	92,4	86,1	79,9	74,8	68,5	61,1	53,0	46,0
	0,84	148,4	131,6	119,5	109,9	101,9	94,6	88,2	81,8	76.6	70.2	62.6	54,3	47,2
1,0	0,60	111,0	98,4	89,4	82,2	76,2	70,8	66,0	61,2	57,3	53,7	46,8	40,6	35,3
	0,62	114,7	101,7	92,4	85,0	78,7	73,2	62,2	63,2	59,2	55,5	48,4	42,0	36,4
	0,64	118,4	105,0	95,4	87,7	81,3	75,5	70,4	65,3	61,1	57,3	49,9	43,3	37,6
	0,66	122,1

Tabloul nr. III

Puterea în kW ce se poate obține într-un grup de termoficare cu contrapresiune cînd se trece prin turbină: 1 tonă abur/oră

Randamentul mecanic × randamentul generatorului $\eta_m \cdot \eta_g$	Randamentul termodinamic al turbinei η_{td}	Parametrii aburului la intrarea în turbină: 90 ata, 500 °C Presiunea aburului la ieșirea din turbină în ata:																	
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	15	17	19	21	31	37
0,87	0,60	125,7	115,7	108,7	102,2	97,5	93,5	89,7	86,4	83,3	80,6	75,7	71,0	66,8	63,4	59,7	45,4	38,9
	0,62	129,9	119,6	112,3	105,6	100,8	96,3	92,7	89,2	86,0	83,3	78,2	73,4	69,0	65,5	61,7	46,9	40,1
	0,64	134,1	123,5	115,9	109,0	104,0	99,1	95,7	92,0	88,8	86,0	80,7	75,8	71,2	67,7	63,7	48,4	41,4
	0,66	138,3	127,4	119,5	112,4	107,3	103,1	98,7	95,8	91,6	88,6	83,2	78,2	73,4	69,8	65,7	49,9	42,7
	0,68	142,5	131,3	123,1	115,8	110,5	106,3	101,7	98,5	94,4	91,3	85,8	80,5	75,7	72,0	67,7	51,4	44,0
	0,70	146,7	135,2	126,5	119,2	113,8	109,5	104,7	100,3	97,1	94,0	88,3	82,9	78,0	74,1	69,7	52,9	45,3
	0,72	150,9	139,0	130,3	122,6	117,0	112,7	107,7	103,1	99,9	96,7	90,9	85,3	80,2	76,2	71,7	54,4	46,6
	0,74	155,1	142,9	133,9	126,0	120,3	115,9	110,7	106,9	102,7	99,4	93,4	87,7	82,4	78,3	73,7	55,9	47,9
	0,76	159,3	146,7	137,5	129,4	123,5	118,1	113,7	109,7	105,4	102,3	95,9	90,0	84,6	80,4	75,7	57,4	49,2
	0,78	163,5	150,6	140,1	132,8	126,8	121,3	116,7	112,5	108,2	105,0	98,4	92,4	86,8	82,5	77,7	58,9	50,5
	0,80	167,7	154,4	144,7	136,2	130,1	124,5	119,7	115,3	111,0	107,6	100,9	94,7	89,0	84,6	79,7	60,4	51,7
	0,82	171,9	158,3	148,3	139,6	133,3	128,7	122,7	118,1	113,8	110,2	103,4	97,1	91,3	86,7	81,7	61,9	53,0
	0,84	175,2	162,2	151,9	143,1	136,6	131,0	125,7	121,9	116,6	112,8	105,9	99,4	93,5	88,9	83,7	63,5	54,3
0,89	0,60	128,5	118,3	111,2	104,5	99,7	95,7	91,8	88,3	85,1	82,4	77,4	72,6	68,3	64,8	61,1	46,4	39,8
	0,62	132,8	122,3	114,8	108,1	103,1	98,9	94,9	91,3	87,9	85,2	79,9	75,1	70,5	67,0	63,1	48,0	41,1
	0,64	137,1	126,3	118,5	111,6	106,4	102,1	98,0	94,2	90,8	87,9	82,5	77,5	72,8	69,2	65,1	49,5	42,4
	0,66	141,4	130,3	122,1	115,1	109,7	105,3	101,0	97,2	93,6	90,6	85,1	79,9	75,1	71,4	67,2	51,0	43,7
	0,68	145,7	134,2	125,8	118,6	113,0	108,5	104,7	100,1	96,4	93,4	87,7	82,3	77,4	73,5	69,2	52,6	45,0
	0,70	150,0	138,2	129,4	122,1	116,3	111,7	107,1	103,1	99,2	96,2	90,3	84,7	79,7	75,7	71,3	54,1	46,3
	0,72	154,4	142,2	133,1	125,6	119,7	114,9	110,2	106,0	102,1	99,0	92,9	87,2	82,0	77,8	73,3	55,7	47,7
	0,74	158,7	146,7	137,7	129,1	123,0	118,1	113,2	109,0	104,9	101,6	95,5	89,6	84,2	80,0	75,3	57,2	49,1
	0,76	163,0	150,1	140,4	132,6	126,3	121,3	116,3	112,9	107,7	104,4	98,1	92,0	86,5	82,2	77,4	58,7	50,4
	0,78	167,3	154,1	144,0	136,1	129,6	124,5	119,3	114,9	110,6	107,2	100,7	94,4	88,8	84,4	79,4	60,3	51,7
	0,80	171,6	158,0	147,7	139,6	132,9	127,7	122,4	117,8	113,4	110,0	103,2	96,8	91,1	86,6	81,5	61,8	53,0
	0,82	175,9	162,0	151,3	143,0	136,3	131,9	125,4	120,8	116,2	112,7	105,8	99,2	93,4	88,8	83,5	63,3	54,3
	0,84	180,2	166,0	155,0	146,5	139,6	134,1	128,5	123,7	119,1	115,5	108,4	101,6	95,6	91,0	85,5	64,9	55,7
0,91	0,60	131,4	121,0	113,7	107,5	101,9	97,8	93,8	90,3	87,0	84,2	79,1	74,2	69,8	66,3	62,5	47,5	40,6
	0,62	135,8	125,0	117,4	111,0	105,3	101,0	97,0	93,3	89,9	87,0	81,7	76,7	72,1	68,5	64,5	49,0	41,6
	0,64	140,2	129,1	121,2	114,5	108,7	104,3	100,1	96,4	92,8	89,9	84,4	79,2	74,4	70,7	66,6	50,6	43,3
	0,66	144,6	133,1	124,9	118,0	112,1	107,6	103,2	99,4	95,7	92,7	87,0	81,7	76,8	73,0	68,7	52,2	44,6
	0,68	149,0	137,1	128,7	121,5	115,5	110,8	106,4	102,4	98,6	95,5	89,7	84,1	79,1	75,2	70,7	53,8	46,0
	0,70	153,4	141,2	132,4	125,0	118,9	114,1	109,5	105,4	101,5	98,3	92,3	86,6	81,4	77,4	72,8	55,4	47,4
	0,72	157,8	145,4	136,2	128,5	122,3	117,4	112,6	108,4	104,4	101,1	95,0	89,1	83,7	79,6	74,9	57,0	48,7
	0,74	162,3	149,2	140,9	132,0	125,7	120,6	115,7	111,4	107,3	104,0	97,7	91,6	86,1	81,8	77,0	58,6	50,1
	0,76	166,7	153,3	143,7	135,5	129,1	123,9	118,9	114,4	110,2	106,8	100,3	94,0	88,4	84,1	79,1	60,1	51,4
	0,78	171,1	157,3	147,4	132,0	132,5	127,2	122,0	117,4	113,2	109,6	103,0	96,5	90,7	86,3	81,2	61,7	52,7
	0,80	—	161,5	151,2	142,5	135,9	130,4	125,2	120,4	116,1	112,4	105,6	99,0	93,0	88,6	83,3	63,3	54,1
	0,82	—	165,4	155,9	146,0	139,6	133,7	128,3	123,4	119,0	115,2	108,2	101,5	95,4	90,8	85,3	64,9	55,5
	0,84	—	—	158,7	149,5	142,8	137,0	131,4	126,4	121,9	118,0	110,5	103,9	97,7	93,0	87,4	66,5	56,9
0,93	0,60	134,3	123,6	116,2	109,2	104,2	99,9	95,8	92,3	88,9	86,1	80,9	75,8	71,4	67,8	63,8	48,5	41,5
	0,62	138,8	127,7	120,9	112,9	107,8	103,2	99,1	95,4	91,8	89,0	83,5	78,4	73,7	70,1	65,9	50,1	42,8
	0,64	143,2	132,9	123,9	116,7	111,1	106,9	102,3	98,5	94,8	91,8	86,2	81,0	76,0	72,3	68,0	51,7	44,2
	0,66	147,9	136,0	127,7	120,4	114,8	110,1	105,5	101,6	97,8	94,7	89,0	83,5	78,4	74,6	70,2	53,3	45,6
	0,68	152,2	140,1	131,6	124,1	118,1	113,4	108,8	104,7	100,8	97,6	91,6	86,0	80,9	76,9	72,3	55,0	47,0
	0,70	156,7	144,3	135,4	127,4	121,8	116,8	111,9	107,7	103,7	100,5	94,3	88,5	83,3	79,1	74,4	56,6	48,4
	0,72	161,2	148,4	139,3	131,1	125,0	120,1	115,1	108 8	106,7	103,4	97,0	91,1	85,7	81,3	76,6	58,3	49,8
	0,74	165,7	152,5	143,1	134,8	128,8	123,5	118,2	113,9	109,7	106,2	99,7	93,6	88,0	83,6	78,7	59,8	51,2
	0,76	170,2	156,7	147,0	138,5	132,0	126,8	121,4	116,9	112,7	109,1	102,4	96,1	90,3	85,9	80.9	61,4	52,6
	0,78	174,7	160,9	150,8	142,2	135,7	130,2	124,7	120,0	115,6	112,0	105,1	98,6	92,8	88,1	83,0	63,0	53,9
	0,80	—	165,0	154,7	146,0	139,0	133,5	127,9	123,1	118,6	114,9	107,8	101,1	95,1	90,4	85,1	64,8	55,3
	0,82	—	169,2	158,5	149,2	142,7	136,8	131,1	126,2	121,6	117,8	110,5	103,7	97,6	92,7	87,2	66,4	56,7
	0,84	—	—	162,2	152,9	146,0	140,1	134,3	129,2	124,6	120,7	113,2	106,2	99,8	95,0	89,3	67,9	57,1
0,94	0,60	135,8	125,0	117,5	110,4	105,2	101,0	96,9	93,3	89,8	87,0	81,7	76,7	72,1	68,5	64,5	49,0	42,0
	0,62	140,4	129,2	121,3	114,2	109,0	104,3	100,2	96,4	92,8	89,9	84,4	79,3	74,5	70,8	66,6	50,6	43,3
	0,64	145,0	133,4	125,2	117,9	112,3	108,1	103,4	99,6	95,8	92,8	87,1	81,8	76,9	73,1	68,8	52,3	44,7
	0,66	149,4	137,6	129,1	121,7	116,0	111,2	106,6	102,7	98,8	95,7	89,9	84,4	79,3	75,4	70,9	53,9	46,1
	0,68	153,9	141,8	133,0	125,4	119,3	114,6	109,9	105,8	101,8	98,7	92,6	86,9	81,7	77,7	73,1	55,6	47,5
	0,70	158,4	146,0	136,9	128,7	123,1	118,0	113,1	108,9	104,9	101,6	95,4	89,4	84,2	79,9	75,2	57,2	48,9
	0,72	163,0	150,2	140,8	132,5	126,4	121,4	116,3	112,0	107,9	104,5	98,1	92,1	86,6	82,2	77,4	58,9	50,3
	0,74	167,6	154,3	144,6	136,3	130,1	124,8	119,5	115,1	110,9	107,4	100,8	94,7	89,0	84,5	79,6	60,5	51,7
	0,76	172,2	158,5	148,5	140,0	133,4	128,2	122,7	118,2	113,9	110,3	103,5	97,1	91,4	86,8	81,7	62,1	53,2
	0,78	176,8	162,6	152,4	143,8	137,2	131,6	126,0	121,3	116,9	113,2	106,3	99,8	93,8	89,1	83,9	63,7	54,5
	0,80	—	166,8	156,3	147,5	140,5	134,9	129,3	124,4	119,9	116,1	109,0	102,2	96,2	91,4	86,1	65,5	55,9
	0,82	—	171,0	160,2	150,8	144,2	138,3	132,5	127,5	122,9	119,0	111,7	104,8	98,6	93,7	88,2	67,1	57,3
	0,84	—	—	164,1	154,6	147,5	141,6	135,8	130,6	125,9	122,0	114,4	107,3	100,9	96,0	90,3	68,7	58,8
0,95	0,60	137,2	126,3	118,7	111,6	106,4	102,1	97,9	94,3	90,9	87,9	82,6	77,5	72,9	69,2	65,2	49,5	42,4
	0,62	141,8	130,5	122,6	115,4	110,2	105,4	101,2	97,4	93,9	90,9	85,3	80,1	75,3	71,6	67,3	51,2	43,8
	0,64	146,4	134,8	126,5	119,2	113,5	109,2	104,3	100,7	96,9	93,8	88,0	82,7	77,7	73,9	69,5	52,9	45,2
	0,66	151,0	139,0	130,4	123,0	117,3	112,4	107,8	103,8	99,9	96,8	90,9	85,3	80,1	76,2	71,7	54,5	46,6
	0,68	155,6	143,3	134,4	126,8	120,6	115,9	111,1	106,9	102,9	99,7	93,6	87,8	82,6	78,5	73,9	56,2	48,0
	0,70	160,2	147,5	138,3	130,1	124,4	119,3	114,3	110,1	106,0	102,6	96,4	90,4	85,1	80,8	76,0	57,8	49,4
	0,72	164,8	151,8	142,2	133,9	127,7	122,7	117,6	113,2	109,0	105,6	99,1	93,1	87,5	83,1	78,2	59,5	50,9
	0,74	169,4	156,0	146,1	137,7	131,5	126,1	120,8	116,3	112,1	108,5	101,9	95,7	89,9	85,4	80,4	61,1	52,3
	0,76	174,0	160,3	150,0	141,5	134,9	129,5	124,0	119,5	115,1	111,5	104,6	98,2	92,3	87,7	82,6	62,7	53,7
	0,78	178,6	164,5	153,9	145,3	138,7	133,0	127,3	122,6	118,1	114,4	107,4	100,8	94,7	90,0	84,8	64,4	55,1
	0,80	—	168,8	158,8	149,1	142,0	136,4	130,7	125,7	121,2	117,4	110,2	103,3	97,1	92,4	87,0	66,2	56,5
	0,82	—	172,9	161,8	152,4	145,8	139,8	133,9	128,9	124,2	120,3	112,9	105,9	99,6	94,7	89,1	67,8	57,9
	0,84	—	—	165,7	156,2	149,1	143,1	137,2	132,0	127,3	123,3	115,7	108,4	102,0	97,0	91,2	69,4	58,4
1,00	0,60	138,0	127,0	119,3	112,2	106,9	102,6	98,4	94,8	91,3	88,4	83,0	77,9	73,3	69,6	65,6	49,8	42,6
	0,62	142,6	131,3	123,2	116,0	110,7	106,0	101,8	97,0	94,3	91,3	85,7	80,6	75,7	71,9	67,7	51,4	44,0
	0,64	147,2	135,5	127,1	119,8	114,1	109,8	105,0	101,2	97,4	94,3	88,5	83,1	78,1	74,2	69,8	53,1	45,4
	0,66	151,8	139,8	131,0	123,6	117,9	113,1	108,3	104,3	100,4	97,2	91,3	85,7	80,6	76,6	72,1	54,8	46,8
	0,68	156,4	144,0	135,0	127,4	121,2	116,5	111,7	107,5	103,5	100,2	94,1	88,3	83,0	78,9	74,2	56,5	48,3
	0,70	161,0	148,3	139,1	130,8	125,1	119,9	114,9	110,6	106,5	103,2	96,9	90,9	85,5	81,2	76,4	58,1	49,7
	0,72	165,6	152,5	143,2	134,6	128,4	123,3	118,2	113,8	109,6	106,1	99,7	93,5	88,0	83,5	78,6	59,8	51,1
	0,74	170,3	156,8	146,9	138,4	132,2	126,8	121,4	116,9	112,6	109,1	102,4	96,1	90,4	85,8	80,8	61,5	52,6
	0,76	174,9	161,0	150,9	142,2	135,6	130,2	124,7	120,1	115,7	112,1	105,2	98,7	92,8	88,2	83,0	63,1	54,0
	0,78	179,5	165,3	154,8	146,1	139,4	133,7	128,0	123,2	118,8	115,0	108,0	101,4	95,3	90,5	85,2	64,7	55,4
	0,80	—	169,5	158,7	149,9	142,7	137,1	131,4	126,4	121,8	118,0	110,7	103,9	97,7	92,9	87,4	66,5	56,8
	0,82	—	173,8	162,6	153,2	146,5	140,5	134,6	129,5	124,9	120,9	113,5	106,5	100,2	95,2	89,5	68,1	58,2
	0,84	—	—	166,6	157,0	149,9	143,9	137,9	132,7	127,9	123,9	116,3	109,1	102,5	97.6	91,7	69,8	59,7
1,00	0,60	144,5	133,0	125,0	117,5	112,0	107,5	103,0	99,3	95,7	92,6	86,9	81,6	76,8	72,9	68,7	52,2	44,7
	0,62	149,4	137,5	129,1	121,5	116,0	111,0	106,5	102,6	98,8	95,7	89,8	84,4	79,3	75,4	70,9	53,9	46,1
	0,64	154,2	141,9	133,2	125,5	119,5	114,5	110,0	106,0	102,0	98,8	92,7	87,1	81,8	77,8	73,2	55,7	47,6
	0,66	159,0	146,4	137,3	129,5	123,5	118,0	113,5	109,3	105,2	101,9	95,7	89,8	84,4	80,3	75,5	57,4	49,1
	0,68	163,8	151,8	141,5	133,5	127,0	122,0	117,0	112,6	108,4	105,0	98,6	92,5	87,0	82,7	77,8	59,2	50,6
	0,70	168,7	155,3	145,6	137,0	131,0	125,5	120,4	115,9	111,6	108,1	101,5	95,2	89,6	85,1	80,1	60,9	52,1
	0,72	173,5	159,7	149,7	141,0	134,5	129,0	123,8	119,2	114,8	111,2	104,4	98,0	92,2	87,5	82,4	62,7	53,6
	0,74	178,3	164,2	153,8	145,0	138,5	132,5	127,2	122,5	118,0	114,3	107,3	100,8	94,7	89,9	84,7	64,4	55,1
	0,76	183,1	168,6	158,0	149,0	142,0	136,0	130,6	12>,8	121,2	117,4	110,2	103,4	97,2	92,4	87,0	66,1	56,6
	0,78	179,9	173,1	162,1	153,0	146,0	139,5	134,1	129,1	124,4	120,5	113,1	106,2	99,8	94,8	89,3	67,8	58,0
	0,80	—	177,5	166,2	157,0	149,5	143,0	137,6	132,4	127,6	123,6	116,0	108,8	102,3	97,3	91,6	69,7	59,5
	0,82	—	182,0	170,3	160,5	153,5	146,5	141,0	135,7	130,8	126,7	118,9	111,6	105,0	99,7	93,7	71,4	61,0
	0,84	—	—	174,5	164,5	157,0	150,0	144,5	139,0	134,0	129,8	121,8	114,2	107,4	102,2	96,1	73,1	62,5

Tabloul nr. V

Indicele de corecție x ce se aplică puterii ce se poate obține într-un grup de termoficare cu contrapresiune (tabloul nr. III) cînd la consumator se cere 1 t abur/h saturat sau supraîncălzit cu 30°C

Valoarea indicelui de corecție x	Randamentul termodinamic al turbinei η_{td}	Parametrii aburului la intrarea în turbină: 90 ata 500°C Presiunea aburului la ieșirea din turbină în ata:																
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	15	17	19	21	31	37
Pentru abur saturat	0,60	0,931	0,921	0,913	0,905	0,901	0,897	0,892	0,887	0,883	0,880	0,870	0,865	0,858	0,853	0,850	0,819	0,804
	0,62	0,938	0,927	0,919	0,912	0,907	0,902	0,897	0,892	0,887	0,884	0,874	0,869	0,802	0,857	0,854	0,822	0,806
	0,64	0,945	0,934	0,925	0,917	0,912	0,907	0,902	0,897	0,892	0,889	0,879	0,873	0,865	0,860	0,857	0,824	0,808
	0,68	0,959	0,947	0,938	0,929	0,923	0,917	0,912	0,906	0,901	0,897	0,888	0,881	0,873	0,867	0,864	0,829	0,812
	0,72	0,974	0,960	0,950	0,941	0,934	0,928	0,924	0,916	0,911	0,906	0,897	0,889	0,880	0,874	0,870	0,834	0,816
	0,76	0,989	0,974	0,963	0,953	0,945	0,938	0,934	0,926	0,920	0,916	0,906	0,897	0,888	0,881	0,874	0,839	0,821
	0,80	—	0,988	0,976	0,966	0,956	0,949	0,944	0,936	0,930	0,925	0,915	0,905	0,896	0,888	0,883	0,844	0,825
	0,84	—	—	0,989	0,978	0,967	0,961	0,954	0,946	0,939	0,934	0,924	0,913	0,904	0,895	0,890	0,849	0,829
Pentru abur supraîncălzit cu 30°C	0,60	0,959	0,949	0,943	0,937	0,932	0,927	0,924	0,920	0,915	0,913	0,907	0,900	0,894	0,890	0,885	0,861	0,849
	0,62	0,966	0,956	0,949	0,943	0,938	0,932	0,929	0,925	0,920	0,917	0,912	0,904	0,898	0,894	0,888	0,863	0,851
	0,64	0,973	0,962	0,956	0,949	0,943	0,938	0,934	0,930	0,924	0,922	0,916	0,908	0,901	0,897	0,891	0,866	0,853
	0,68	0,988	0,976	0,969	0,961	0,954	0,949	0,944	0,940	0,934	0,931	0,925	0,916	0,909	0,904	0,898	0,871	0,857
	0,72	—	0,989	0,981	0,973	0,966	0,960	0,955	0,950	0,944	0,940	0,934	0,924	0,917	0,911	0,905	0,876	0,861
	0,76	—	—	0,994	0,986	0,978	0,971	0,965	0,960	0,954	0,950	0,943	0,932	0,925	0,919	0,912	0,881	0,866
	0,80	—	—	—	0,998	0,989	0,983	0,976	0,970	0,964	0,959	0,952	0,940	0,933	0,927	0,919	0,886	0,870
	0,84	—	—	—	—	—	0,994	0,987	0,981	0,974	0,969	0,961	0,950	0,941	0,934	0,926	0,892	0,874

Observație: Puterea ce se poate obține într-un grup cu contrapresiune pentru o tonă de abur saturat/h cerut de consumator se determină prin produsul puterii obținute pentru o tonă de abur/h trecută prin turbină (din tabloul nr. III) cu coeficientul x de corecție din acest tablou.

Tabloul

Indicele de corecție a ce se aplică puterii ce se poate obține într-un grup de termoficare cu contrapresiune al CET, pentru alimentarea cazanului cu apă

Randamentul termodinamic al turbinei η_{td}	Procentul recuperării de condensat %	Parametrii aburului la intrarea Presiunea aburului la				
		2	3	4	5	6
0,60	0	0,182	0,207	0,226	0,242	0,256
	20	0,146	0,165	0,180	0,194	0,204
	40	0,109	0,124	0,135	0,145	0,153
	60	0,073	0,083	0,090	0,097	0,102
	80	0,036	0,042	0,045	0,048	0,051
	100	0	0	0	0	0
0,62	0	0,183	0,208	0,227	0,243	0,257
	20	0,147	0,166	0,181	0,195	0,205
	40	0,110	0,125	0,136	0,146	0,154
	60	0.073	0,084	0,091	0,097	0,102
	80	0,036	0,042	0,045	0,048	0,051
	100	0	0	0	0	0
0,64	0	0,185	0,209	0,228	0,244	0,258
	20	0,148	0,167	0,183	0,196	0,206
	40	0,111	0,126	0,137	0,147	0,155
	60	0,074	0,085	0,092	0,097	0,103
	80	0,037	0,042	0,045	0.048	0,051
	100	0	0	0	0	0
0,68	0	0,187	0,211	0,233	0,246	0,260
	20	0,149	0,169	0,185	0,197	0,208
	40	0,112	0,127	0,139	0,148	0,156
	60	0,074	0,085	0,093	0,098	0,104
	80	0,037	0,043	0,046	0,049	0,052
	100	0	0	0	0	0
0,72	0	0,189	0,214	0,023	0,248	0,262
	20	0,151	0,171	0,186	0,199	0,209
	40	0,113	0,128	0,140	0,149	0,157
	60	0,075	0,085	0,093	0,099	0,104
	80	0,037	0,044	0,046	0,049	0,052
	100	0	0	0	0	0
0,76	0	0,191	0,216	0,235	0,251	0,264
	20	0,153	0,173	0,187	0,201	0,211
	40	0,114	0,189	0,141	0,150	0,158
	60	0,076	0,086	0,094	0,100	0,105
	80	0,038	0,044	0,047	0,050	0,052
	100	0	0	0	0	0
0,80	0	0,193	0,218	0,237	0,253	0,266
	20	0,155	0,174	0,188	0,203	0,213
	40	0,115	0,131	0,142	0,151	0,159
	60	0,077	0,873	0,094	0,101	0,106
	80	0,039	0,045	0,047	0,050	0,053
	100	0	0	0	0	0
0,84	0	0,195	0,220	0,239	0,255	0,268
	20	0,156	0,176	0,190	0,204	0,214
	40	0,117	0,132	0,143	0,153	0,161
	60	0,078	0,088	0,095	0,102	0,107
	80	0,039	0,046	0,047	0,051	0,053
	100	0	0	0	0	0

Observație: Puterea suplimentară ce se poate obține din aburul preluat de circuitul regenerativ se cu coeficientul a de corecție din acest tablou.

nr. VI

(tabloul nr. II) pentru a calcula surplusul de putere obținută din aburul trimis în circuitul regenerativ la temperatura de saturație a prizei respective

în turbină: 35 ata, 435°C
ieșirea din turbină în ata:

7	8	9	10	11	13	15	17
0,268	0,279	0,288	0,297	0,306	0,320	0,335	0,348
0,214	0,223	0,231	0,238	0,245	0,257	0,268	0,279
0,160	0,167	0,173	0,178	0,184	0,193	0,201	0,209
0,107	0,111	0,115	0,119	0,122	0,128	0,134	0,139
0,053	0,055	0,057	0,059	0,061	0,064	0,067	0,069
0	0	0	0	0	0	0	0
0,269	0,280	0,289	0,298	0,307	0,322	0,336	0,349
0,215	0,224	0,231	0,239	0,246	0,258	0,269	0,279
0,161	0,168	0,173	0,179	0,184	0,193	0,201	0,209
0,107	0,112	0,115	0,119	0,123	0,129	0,134	0,139
0,053	0,056	0,057	0,059	0,061	0,064	0,067	0,069
0	0	0	0	0	0	0	0
0,270	0,281	0,290	0,299	0,308	0,323	0,337	0,350
0,216	0,225	0,232	0,240	0,247	0,259	0,269	0,280
0,162	0,168	0,174	0,179	0,185	0,194	0,202	0,210
0,108	0,112	0,116	0,119	0,123	0,129	0,134	0,140
0,054	0,056	0,058	0,059	0,061	0,064	0,067	0,070
0	0	0	0	0	0	0	0
0,272	0,282	0,292	0,301	0,310	0,325	0,338	0,351
0,217	0,226	0,233	0,241	0,248	0,260	0,270	0,281
0,163	0,169	0,175	0,180	0,186	0,195	0,203	0,210
0,108	0,113	0,116	0,120	0,124	0,130	0,135	0,140
0,054	0,056	0,058	0,060	0,062	0,065	0,067	0,070
0	0	0	0	0	0	0	0
0,274	0,284	0,294	0,303	0,311	0,326	0,340	0,352
0,219	0,227	0,235	0,242	0,249	0,261	0,272	0,282
0,164	0,170	0,176	0,182	0,187	0,196	0,204	0,211
0,109	0,113	0,117	0,121	0,124	0,130	0,136	0,141
0,054	0,056	0,058	0,060	0,062	0,065	0,068	0,070
0	0	0	0	0	0	0	0
0,276	0,286	0,296	0,305	0,313	0,328	0,341	0,354
0,220	0,229	0,237	0,244	0,250	0,262	0,273	0,283
0,165	0,172	0,177	0,183	0,188	0,197	0,204	0,212
0,110	0,114	0,118	0,122	0,125	0,131	0,136	0,141
0,055	0,057	0,059	0,061	0,062	0,065	0,068	0,070
0	0	0	0	0	0	0	0
0,278	0,288	0,298	0,307	0,315	0,330	0,342	0,355
0,222	0,231	0,238	0,245	0,252	0,264	0,274	0,284
0,166	0,173	0,178	0,184	0,189	0,198	0,205	0,213
0,111	0,115	0,119	0,122	0,126	0,132	0,137	0,142
0,055	0,057	0,059	0,061	0,062	0,066	0,068	0,071
0	0	0	0	0	0	0	0
0,280	0,290	0,300	0,310	0,317	0,331	0,344	0,356
0,224	0,232	0,240	0,248	0,253	0,265	0,275	0,285
0,167	0,174	0,180	0,186	0,190	0,199	0,206	0,214
0,112	0,116	0,120	0,124	0,126	0,132	0,137	0,142
0,056	0,058	0,060	0,062	0,063	0,066	0,068	0,071
0	0	0	0	0	0	0	0

determină prin produsul puterii obținute pentru o tonă de abur/h trecută prin turbină (din tabloul nr. II)

Tabloul

Indicele de corecție a ce se aplică puterii ce se poate obține într-un grup de termoficare cu contrapresiune al CET. pentru alimentarea cazanului cu apă

Randamentul termodinamic al turbinei η_{td}	Procentul recuperării de condensat %	Parametrii aburului la intrarea Presiunea aburului la					
		2	3	4	5	6	7
0,60	0	0,185	0,210	0,230	0,246	0,260	0,273
	0,2	0,148	0,168	0,183	0,197	0,208	0,218
	0,4	0,111	0,126	0,138	0,148	0,156	0,164
	0,6	0,074	0,084	0,092	0,098	0,104	0,109
	0,8	0,037	0,042	0,046	0,049	0,052	0,054
	1	0	0	0	0	0	0
0,62	0	0,187	0,212	0,231	0,248	0,262	0,275
	0,2	0,149	0,169	0,184	0,199	0,209	0,220
	0,4	0,112	0,127	0,139	0,148	0,157	0,165
	0,6	0,074	0,084	0,092	0,099	0,104	0,110
	0,8	0,037	0,042	0,046	0,049	0,052	0,055
	1	0	0	0	0	0	0
0,64	0	0,188	0,213	0,233	0,249	0,263	0,276
	0,2	0,150	0,171	0,185	0,200	0,211	0,221
	0,4	0,113	0,128	0,139	0,149	0,158	0,165
	0,6	0,075	0,085	0,093	0,099	0,105	0,110
	0,8	0,038	0,062	0,046	0,049	0,052	0,055
	1	0	0	0	0	0	0
0,68	0	0,191	0,216	0,236	0,252	0,266	0,279
	0,2	0,153	0,173	0,188	0,202	0,213	0,223
	0,4	0,114	0.130	0.141	0,151	0,160	0,167
	0,6	0,076	0,086	0,094	0,101	0,106	0,111
	0,8	0,038	0,043	0,047	0,050	0,053	0,055
	1	0	0	0	0	0	0
0,72	0	0,194	0,219	0,239	0,256	0,270	0,283
	0,2	0,155	0,175	0,190	0,205	0,216	0,226
	0,4	0,116	0,131	0,143	0,153	0,162	0,169
	0,6	0,077	0,087	0,095	0,102	0,108	0,113
	0,8	0,038	0,043	0,047	0,051	0,054	0,056
	1	0	0	0	0	0	0
0,76	0	0,197	0,223	0,242	0,259	0,273	0,286
	0,2	0,157	0,178	0,193	0,208	0,218	0,229
	0,4	0,118	0,133	0,145	0,155	0,164	0,172
	0,6	0,078	0,089	0,097	0,104	0,109	0,114
	0,8	0,059	0,044	0,048	0,052	0,054	0,057
	1	0	0	0	0	0	0
0,80	0	0,200	0,226	0,246	0,262	0,277	0,289
	0,2	0,160	0,810	0,195	0,210	0,221	0,231
	0,4	0,120	0,135	0,147	0,157	0,166	0,173
	0,6	0,080	0,090	0,098	0,105	0,110	0,115
	0,8	0,040	0,045	0,049	0,052	0,055	0,057
	1	0	0	0	0	0	0
0,84	0	0,203	0,229	0,249	0,266	0,280	0,293
	0,2	0,162	0,183	0,198	0,213	0,224	0,234
	0,4	0,122	0,139	0,149	0,159	0,168	0,175
	0,6	0,081	0,091	0,100	0,106	0,112	0,117
	0,8	0,040	0,045	0,050	0,053	0,056	0,058
	1	0	0	0	0	0	0

Observație: Puterea suplimentară ce se poate obține din aburul preluat de circuitul regenerativ se cu coeficientul a de corecție din acest tablou.

nr. VII

(tabloul nr. III), pentru a calcula surplusul de putere obţinută din aburul trimis în circuitul regenerativ la temperatura de saturaţie a prizei respective

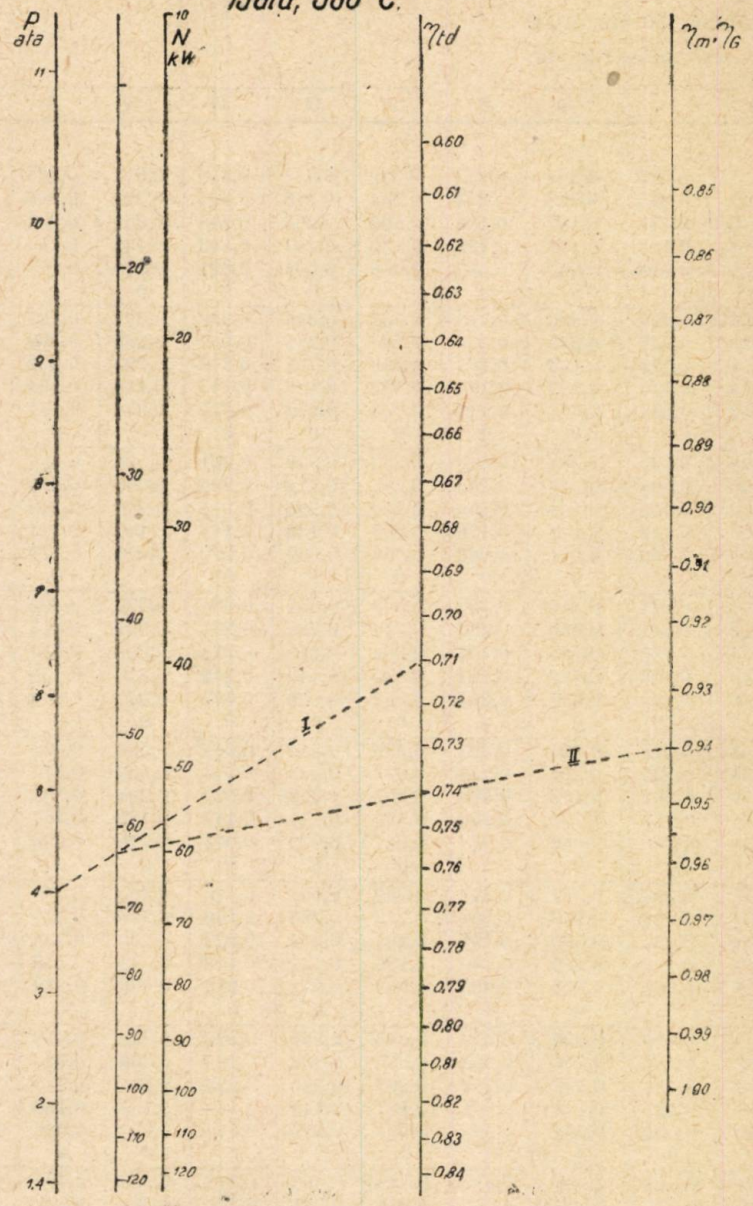
în turbină: 90 ata, 500°C

eşirea din turbină în ata:

8	9	10	11	13	15	17	19	21	31	37
0,284	0,295	0,304	0,313	0,330	0,344	0,358	0,371	0,385	0,433	0,459
0,227	0,236	0,243	0,251	0,264	0,275	0,286	0,297	0,308	0,347	0,367
0,170	0,177	0,182	0,188	0,198	0,206	0,215	0,222	0,231	0,260	0,275
0,113	0,118	0,121	0,125	0,132	0,137	0,143	0,148	0,154	0,173	0,183
0,056	0,059	0,060	0,062	0,066	0,068	0,071	0,074	0,077	0,086	0,091
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,286	0,296	0,306	0,315	0,331	0,346	0,359	0,372	0,387	0,435	0,460
0,229	0,237	0,244	0,252	0,265	0,277	0,287	0,298	0,309	0,348	0,368
0,171	0,177	0,183	0,189	0,199	0,207	0,215	0,223	0,232	0,261	0,276
0,114	0,118	0,122	0,126	0,132	0,138	0,143	0,149	0,154	0,174	0,184
0,057	0,059	0,061	0,063	0,066	0,069	0,071	0,074	0,077	0,087	0,092
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,288	0,298	0,307	0,316	0,333	0,348	0,361	0,374	0,388	0,436	0,462
0,230	0,238	0,246	0,253	0,266	0,278	0,289	0,299	0,310	0,349	0,369
0,172	0,178	0,184	0,190	0,200	0,208	0,217	0,224	0,233	0,262	0,277
0,115	0,119	0,123	0,126	0,133	0,139	0,144	0,149	0,155	0,174	0,184
0,057	0,059	0,061	0,063	0,066	0,069	0,072	0,074	0,077	0,087	0,092
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,291	0,301	0,310	0,320	0,337	0,351	0,364	0,377	0,392	0,438	0,464
0,232	0,241	0,248	0,256	0,269	0,280	0,291	0,301	0,313	0,351	0,371
0,174	0,180	0,186	0,192	0,202	0,210	0,218	0,226	0,234	0,263	0,279
0,116	0,120	0,124	0,128	0,134	0,140	0,145	0,150	0,156	0,175	0,185
0,058	0,060	0,062	0,064	0,067	0,070	0,072	0,075	0,078	0,087	0,092
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,294	0,304	0,314	0,323	0,339	0,354	0,367	0,380	0,394	0,441	0,466
0,235	0,243	0,251	0,258	0,271	0,283	0,294	0,304	0,315	0,353	0,373
0,176	0,182	0,188	0,194	0,203	0,212	0,220	0,228	0,236	0,264	0,280
0,117	0,121	0,125	0,129	0,135	0,141	0,147	0,152	0,157	0,176	0,186
0,058	0,060	0,062	0,064	0,067	0,070	0,073	0,076	0,078	0,088	0,093
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,297	0,307	0,317	0,326	0,342	0,357	0,370	0,383	0,397	0,443	0,469
0,238	0,246	0,253	0,261	0,273	0,285	0,296	0,306	0,317	0,355	0,374
0,178	0,184	0,190	0,195	0,205	0,214	0,222	0,230	0,238	0,266	0,281
0,119	0,123	0,126	0,130	0,136	0,142	0,148	0,153	0,158	0,177	0,187
0,059	0,061	0,063	0,065	0,068	0,071	0,074	0,076	0,079	0,088	0,093
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,300	0,310	0,320	0,329	0,346	0,360	0,373	0,386	0,400	0,445	0,471
0,240	0,248	0,256	0,263	0,275	0,288	0,299	0,309	0,320	0,357	0,377
0,180	0,186	0,192	0,197	0,207	0,216	0,224	0,231	0,240	0,268	0,282
0,120	0,124	0,128	0,131	0,137	0,144	0,149	0,154	0,160	0,178	0,188
0,060	0,062	0,064	0,065	0,069	0,072	0,074	0,077	0,080	0,089	0,094
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,304	0,314	0,323	0,332	0,349	0,363	0,377	0,389	0,403	0,449	0,473
0,243	0,251	0,259	0,266	0,278	0,291	0,301	0,311	0,322	0,359	0,379
0,182	0,188	0,194	0,199	0,209	0,218	0,226	0,233	0,242	0,269	0,284
0,121	0,125	0,129	0,133	0,139	0,150	0,150	0,155	0,161	0,179	0,189
0,060	0,062	0,064	0,066	0,069	0,072	0,075	0,077	0,080	0,070	0,094
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

determină prin produsul puterii obţinute pentru o tonă de abur/h trecută prin turbină (din tabloul nr. III)

PUTEREA CE SE POATE OBȚINE INTR-UN GRUP DE TERMOFICARE CU CONTRAPRESIUNE DE FIECARE t abur/h TRECUTĂ PRIN TURBINĂ. PARAMETRII ABURULUI LA INTRAREA IN TURBINĂ. 15ata, 350°C.



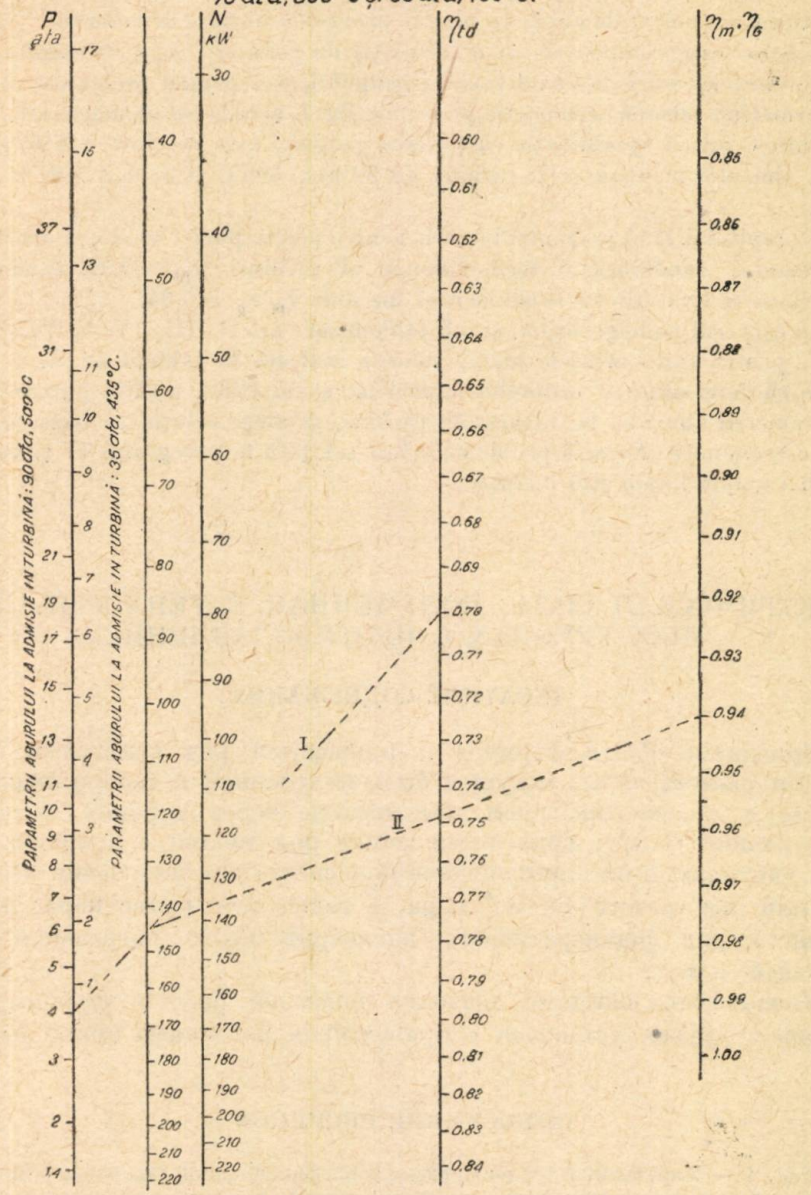
Exemplu: Parametrii aburului la intrarea în turbină 15 ata, 350°C. Presiunea aburului la ieșirea din turbină 4 ata. Randamentul termodinamic 0,71

Randament mecanic x randament generator 0,94

Rezultă puterea ce se poate obține 59 KW.

Nomograma 1

PUTEREA CE SE POATE OBȚINE INTR-UN GRUP DE TERMOFICARE CU CONTRAPRESIUNE DE FIECARE t abur/h TRECUTĂ PRIN TURBINĂ. PARAMETRII ABURULUI LA INTRAREA IN TURBINĂ: 90 ata, 500°C și 35 ata, 435°C.



Exemplu: Parametrii aburului la intrarea în turbină 90 ata, 500°C. Randament mecanic x randament generator 0,94
Presiunea aburului la ieșirea din turbină 4 ata
Randamentul termodinamic 0,70
Rezultă puterea ce se poate obține 137 kW

Nomograma 2—3

Se întocmeşte o schemă simplificată (fig. 1) cu contrapresiune la 4 ata. Se consideră că preîncălzirea condensatului se face la temperatura de saturaţie a prizei (142,92°C) cu abur preluat la priza turbinei. Cazanele de abur trebuie să acopere tot necesarul de abur. În plus se prevede o unitate de rezervă.

Schema este completată cu o instalaţie de reducere, care să asigure aburul la presiunea necesară în cazul reviziei grupului, sau pentru preluarea vîrfurilor.

Urmărind schema termică de principiu (fig. 1) şi folosind nomogramele, se constată într-o primă aproximaţie că puterea grupului este de circa 8 MW, la parametrii aburului la intrarea în turbină de 90 ata, 500°C şi de 5,8 MW la 35 ata, 435°C.

În capitolul II al prezentei lucrări, pentru aceste puteri se indică următoarele randamente: randamentul termodinamic al turbinei $\eta_{td} = 0,72$, randamentul generatorului înmulţit cu randamentul mecanic $\eta_m \cdot \eta_g = 0,94$.

Cu ajutorul nomogramelor şi al tablourilor nr. II, III, IV, V, VI şi VII se găsesc, pentru randamentele luate, valorile indicate în tabloul nr. 4.

După determinarea ordinului de mărime a unităţilor, a căror putere depinde de parametrii aburului la intrarea în turbină, se alege soluţia pe baza calculelor tehnico-economice. Această problemă a fost schiţată în paragraful IV şi va fi tratată mai amplu într-o altă lucrare.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИЛА, ПОЛУЧЕННАЯ В ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ГРУППАХ С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Выводится общая формула и приводится ряд номограмм и таблиц для расчета силы, могущей быть полученной в теплофикационной группе, с противодавлением при проходе через турбину количества пара, равного 1 т/ч; приводится также ряд таблиц с поправками на силу, учитывающими впрыскивание конденсата для получения насыщенного или перегретого на 30° пара, а также количество пара, использованного для регенеративного предварительного нагревания воды, питающей котел.

Указываются обычные значения полезной работы турбины, генераторов и других установок с приведением численных примеров.

ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1.— Упрощенная тепловая схема теплофикационной установки с приданной ей группой с противодавлением, предназначенная для питания водой котла при температуре насыщения и соответствующем давлении и с возвращением конденсата при той же температуре. *c* — тепловой потребитель; *b* — охладитель пара.

Рис. 2. — Диаграмма работы турбины с противодавлением. N_{max} — максимальная мощность турбины; Q_{max} — количество пара, прошедшего через турбину при максимальной нагрузке; Q_0 — то же на холостом ходу.

PUISSANCE ÉLECTRIQUE POUVANT ÊTRE OBTENUE DANS DES GROUPES TURBO-ALTERNATEURS À CONTRE-PRESSION

(RÉSUMÉ)

On déduit une formule générale et l'on donne une série de nomogrammes et de tableaux pour le calcul de la puissance pouvant être obtenue dans un groupe turbo-alternateur à contrepression, lorsqu'on fait passer par la turbine un débit de vapeur de 1 t/h; on donne également une série de tableaux indiquant des corrections de puissance tenant compte de l'injection de condensé pour l'obtention d'une vapeur saturée ou surchauffée de 30°C, ainsi que du débit de vapeur prélevé pour le réchauffage régénératif de l'eau d'alimentation de la chaudière.

On indique les valeurs usuelles pour les rendements de la turbine, des générateurs et des autres installations. Un exemple numérique accompagne l'article.

EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — Schéma thermique simplifiée d'une centrale équipée d'un groupe à contrepression, dans l'hypothèse où la chaudière est alimentée avec de l'eau à la température de saturation de la pression de la prise respective, et le condensé y est récupéré à la même température. c = consommateur thermique; b = réfrigérant de vapeurs.

Fig. 2. — Diagramme de fonctionnement de la turbine à contrepression.

N_{max} = puissance maximum de la turbine;

Q_{max} = débit de vapeurs passé par la turbine à charge maximum.

Q_0 = idem à vide.

BIBLIOGRAFIE

1. A. A. Lagovski și V. B. Pakșver, *Centrale termoelectrice*. Ed. tehnică, București, 1952, p. 35.
2. *** *Kratkii tehniceskii spravocinik*. Gosudarstvennoe izdatelstovo tehniko-teoreticeskoi literaturî. Moscova—Leningrad, 1950, vol. II, p. 207.
3. V. I. Jurenev, *Promișlennie paroturbinie elektriceskie stanții*. Moscova—Leningrad, 1952, p. 34—35.
4. L. I. Kerțelli și V. Rîjkin, *Centrale termoelectrice*. Ed. energetică de Stat, București, 1952.
5. A. Kroms, Die Technik, R.D.G., 1951, nr. 10, p. 447—456.
6. A. N. Lojkin, *Transformatori de căldură*. Ed. tehnică, București, 1952.
7. *** *Proprietățile termodinamice ale aburului*. Ed. tehnică, 1951.
8. M. V. Pentkovski, *Nomografia*. Ed. tehnică, București, 1952.
9. M. P. Vucalovici, *Termodinamiceskie svoistva vodi i vodianovo para*. Moscova, 1951.
10. M. P. Weitz, *Programul tehnic al energeticii în U.R.S.S.* Ed. tehnică, București, 1951.
11. *** *Nomograme termotehnice*. Ed. tehnică, București, 1950.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul IV, 1954

TERMOENERGETICA

ASUPRA LIMITELOR DE PUTERE LA FUNCŢIONAREA CU PETROL LAMPANT A MOTOARELOR DE TRACTOR

DE

C. ARAMĂ

Folosirea petrolului lampant la motoarele de tractoare, cu aprindere prin scînteie, construite pentru combustibil (« petrol tractor »), cu cifră octanică superioară aceleia a petrolului lampant, antrenează apariţia detonaţiei de mare intensitate pentru care motiv este intolerabilă.

Utilizarea metodelor constructive cunoscute (modificarea formei camerei de ardere, micşorarea raportului de comprimare etc.) pentru reducerea sau înlăturarea completă a detonaţiei nu este totdeauna posibilă. De asemenea, practicarea injecţiei de apă în canalizarea de admisie nu se recomandă, din cauza corodării puternice a supapelor.

Singura metodă comodă şi eficace constă în ameliorarea calităţilor petrolului lampant prin amestecarea lui cu benzină.

În cele ce urmează redăm rezultatele încercărilor efectuate asupra unui motor de tractor alimentat cu amestec de petrol lampant şi benzină, în vederea determinării limitelor de putere fără detonaţie.

Motorul cu aprindere prin scînteie încercat are 4 cilindri de 105 × 127 mm, raport de comprimare 3,81, ordinea de aprindere 1—2—4—3, pistoane şi chiulasă din fontă, supape laterale. La bancul de probă, motorul încercat a avut 24,7 CP la 1 100 rot/min, funcţionînd cu petrol tractor.

Motorul a fost alimentat cu amestecuri de diferite proporţii de petrol lampant şi benzină.

S-a determinat valoarea puterii motorului frînat, cu detonaţie incipientă, pentru fiecare amestec în parte. Această valoare a fost numită «limită de putere». La fiecare caz arătat mai sus, s-a căutat să se mărească limita de putere, fără a depăşi starea de detonaţie incipientă, prin modificarea convenabilă a avansului la aprindere.

Pentru fiecare încercare s-a notat poziţia obturatorului şi valoarea avansului respectiv la aprindere. În toate încercările, turaţia motorului a fost menţinută constantă şi anume 1 100 rot/min. De asemenea, nu s-au modificat valorile factorilor care exercită influenţe asupra funcţionării motorului.

Intensitatea detonaţiei a fost înregistrată la oscilograf prin folosirea metodei electro-acustice. Utilizînd un oscilograf cu mai multe bucle, s-a înregistrat pe peliculă în acelaşi timp: frecvenţa reţelii, ca bază de timp; momentul de ruptură a unui mecanism cu camă montat pe arborele frînei, pentru identificarea cilindri-

lor; poziţia sistemului de reglare a avansului la aprindere, pentru identificarea regimului funcţional al motorului; zgomotele produse de detonaţie.

Încercările la banc au arătat că influenţe sensibile asupra intensităţii detonaţiei au numai valoarea sarcinii şi a avansului la aprindere. Variaţiile dozajului, în limitele admisibile, n-au arătat influenţe detectabile asupra intensităţii detonaţiei.

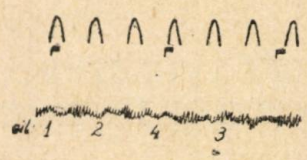


Fig. 1

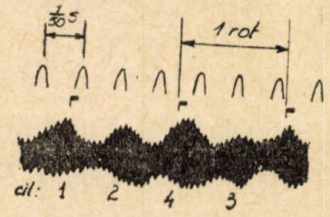


Fig. 2

La funcţionarea motorului cu amestec de 30% benzină şi 70% petrol lampant, influenţa valorii avansului la aprindere este deosebit de importantă. Astfel, la un avans de 4°5 nu se produce detonaţie (fig. 1), pe cînd la un avans de 9° aceasta apare net şi de intensitate inadmisibilă (fig. 2).

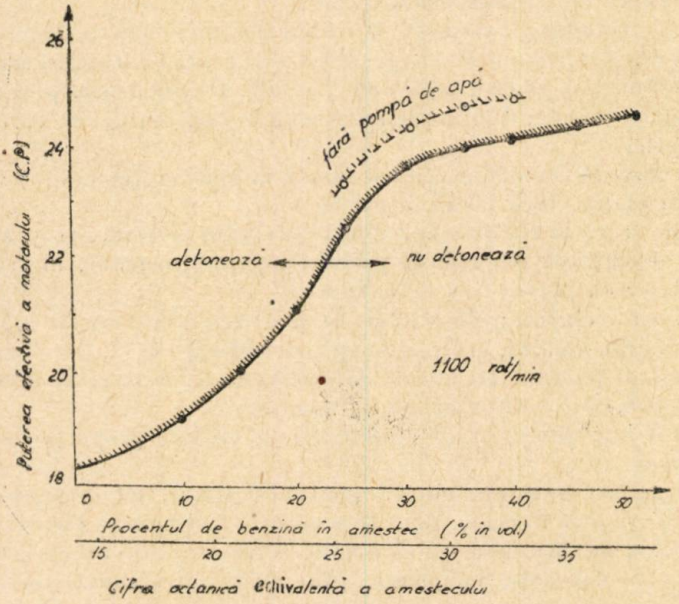
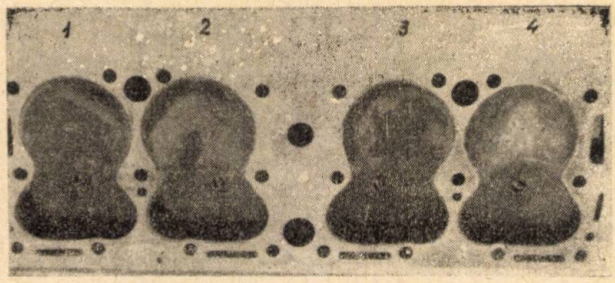


Fig. 3

În figura 3 se arată rezultatele încercărilor pentru determinarea limitelor de putere. Se observă că puterea efectivă a motorului creşte mai întîi repede odată cu mărirea procentului de benzină în amestec (sau cu cifra octanică echivalentă a amestecului). Începînd de la aproximativ 25% benzină în amestec, puterea motorului creşte mai puţin repede. Această comportare se explică prin aceea că, în acelaşi timp cu creşterea cifrei octanice a amestecului şi a puterii motorului, obtura-



Flg. 4

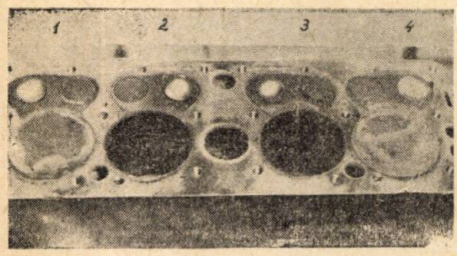


Fig 5

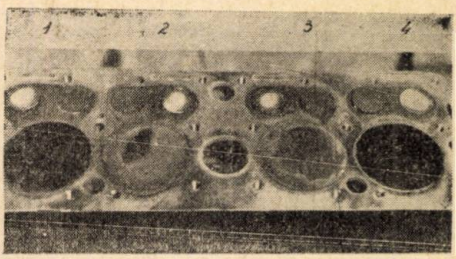


Fig. 6

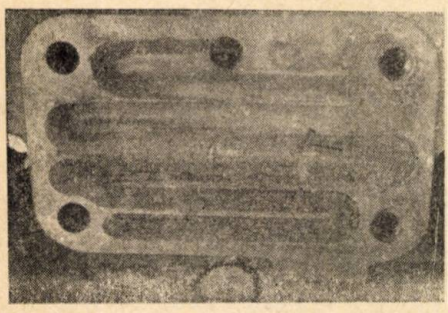


Fig. 7

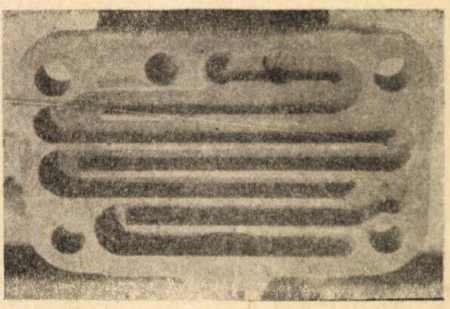


Fig. 8

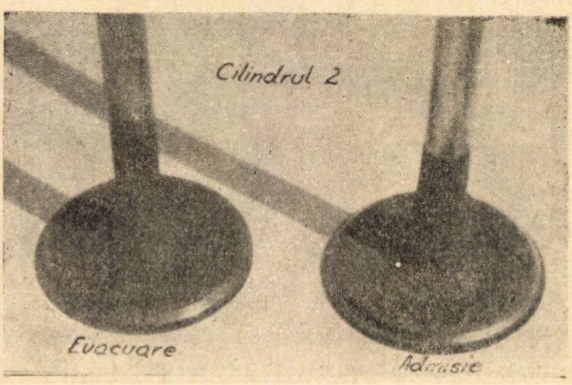


Fig. 9

torul este din ce în ce mai deschis, ceea ce favorizează apariţia detonaţiei prin efect de presiune.

După cum se vede din figura 3, amestecul de petrol lampant şi 50% benzină restabileşte puterea motorului (aproximativ 24,6 CP) funcţionînd cu petrol tractor. De asemenea, la un amestec cu 30% benzină, pierderea de putere este de aproximativ 1 CP, adică de aproximativ 4% faţă de puterea nominală. Ca urmare, se recomandă folosirea unui amestec de petrol lampant cu 30% benzină.

Recuperarea pierderii menţionate la folosirea amestecului recomandat este posibil de realizat. Într-adevăr, prin desfiinţarea pompei (« morişcă ») de apă, e obţine o creştere a puterii efective a motorului de aproximativ 1 CP, la regimul nominal.

Suspendarea pompei de apă este nu numai posibilă, ci chiar indicată, deoarece în acest mod se realizează reducerea apreciabilă a duratei de încălzire pentru pornire, precum şi o mai activă vaporizare a combustibilului la orice regim de funcţionare. Cum sistemul original de răcire a motorului este dezvoltat după principiul termosifonului, suspendarea pompei de apă nu antrenează nici o perturbaţie funcţională a motorului.

Probele de durată cu amestecul recomandat au arătat că uzurile mecanice ale motorului nu sînt afectate prin schimbarea combustibilului. De asemenea, depunerile de funingine şi zgură nu sînt activate prin utilizarea amestecului recomandat.

Astfel, după o durată de funcţionare de aproximativ 800 ore cu amestecul recomandat, la limita respectivă de putere, depunerile pe pereţii chiulasei (fig. 4), pistoanelor şi supapelor (fig. 5 şi 6) sînt normale, corespunzătoare duratei respective de funcţionare. Depunerile pe cutia (fig. 7) şi pe capacul (fig. 8) vaporizatorului sînt neînsemnate.

De asemenea, depunerile în canalizarea de admisie şi de evacuare, pe porţile supapelor şi pe supape (fig. 9) sînt practic identice cu acelea din cazul funcţionării normale cu petrol tractor.

În concluzie, date fiind rezultatele obţinute la bancul de încercări şi la probele de durată, se recomandă, pentru motoarele de tractoare similare celui încercat, folosirea unui amestec de petrol lampant cu 30% benzină, cu un avans de 4°5. În modul acesta, se poate face faţă cu succes lipsei de petrol tractor în exploatare, la tractoarele agricole. Pentru tractoarele rutiere, se va utiliza amestecul cu proporţia de benzină ce reiese din diagrama din figura 3, în funcţie de valoarea puterii efective necesare. De exemplu, dacă puterea efectivă necesară tracţiunii rutiere se apreciază că nu depăşeşte 19 CP, se poate utiliza un amestec de petrol lampant cu 10% benzină, fără pericolul apariţiei detonaţiei, atît timp cît nu se depăşeşte limita respectivă de putere. Pentru suprasarcinile de scurtă durată, în acest caz, se poate utiliza trecerea la etaje inferioare de viteză cu ajutorul cutiei de viteze, ceea ce conduce la scoaterea motorului din regim detonant, în aceste perioade de scurtă durată.

О ПРЕДЕЛАХ МОЩНОСТИ ТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РАБОТЕ НА КЕРОСИНЕ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

В настоящем сообщении излагаются результаты испытания тракторного двигателя, питаемого смесями керосина и бензина в целях определения максимальной мощности при отсутствии детонации. Испы-

тания доказали большое влияние, оказываемое опережением зажигания на силу детонации. На рисунке 1 показана запись на пленке осциллографа с несколькими завитками шумов двигателя при применении смеси с 30% бензина и при опережении зажигания в 4,5°. Отмечается, что в этом случае не происходит детонации, но что при таких же условиях и при опережении зажигания в 9° (рис.2) происходит сильная детонация.

На рисунке 3 показано изменение предела мощности в зависимости от процентного содержания бензина в смеси или от эквивалентного октанового числа смеси.

Рекомендуется применение смеси с 30% бензина.

При такой смеси мощность двигателя на 1 л с. меньше номинальной. Путем устранения водяного насоса при применении рекомендуемой смеси восстанавливается номинальная мощность двигателя. Устранение водяного насоса представляет к тому же то преимущество, что сокращает время пускового нагревания и значительно усиливает испарение горючего.

Испытания на прочность показали, что перемена горючего практически не влияет на механический износ двигателя, на отложение копоти и нагара, на стенки крышки цилиндров (рис.4,) поршни и клапаны (рис.5 и 6), на коробку (рис.7) и крышку (рис.8) вапоризатора и на отложения в впускных и выходных трубопроводах, а также на седлах клапанов и на них самих (рис. 9).

DES LIMITES DE PUISSANCE DES MOTEURS DE TRACTEURS FONCTIONNANT AU PÉTROLE LAMPANT

(RÉSUMÉ)

On expose les essais d'un moteur de tracteur alimenté avec des mélanges de pétrole lampant et d'essence, en vue de déterminer le maximum de puissance sans détonation. Les essais ont prouvé la grande influence de l'avance à l'allumage sur l'intensité de la détonation. La figure 1 montre l'enregistrement, sur la pellicule d'un oscillographe à plusieurs boucles, des bruits du moteur, pour un mélange de 30% d'essence et une avance à l'allumage de 4°5. On remarque que, dans ce cas, il ne se produit pas de détonation, mais que, dans les mêmes conditions, il se produit une détonation intense avec une avance de 9° (fig 2).

La figure 3 montre la variation de la limite de puissance en fonction du pourcentage d'essence du mélange, ou du chiffre d'octane équivalent au mélange.

On recommande l'emploi du mélange à 30% d'essence. En utilisant ce mélange, la puissance du moteur est d'un CV moindre par rapport à la puissance nominale. En supprimant la pompe à eau, on rétablit, avec le mélange proposé, la puissance nominale du moteur. La suppression de la pompe à eau n'entraîne aucune perturbation fonctionnelle, le système original de refroidissement se développant sur le principe du thermosiphon. La suppression de la pompe à eau offre, de plus, l'avan-

tage de réduire le temps d'échauffement au démarrage ainsi que d'activer sensiblement la vaporisation du combustible.

Les essais de durée ont démontré que les usures mécaniques du moteur ainsi que les dépôts de suies et de scories sur les parois de la culasse (fig. 4), des pistons et des soupapes (fig. 5 et 6), sur la boîte (fig. 7) et sur le couvercle (fig. 8) du vaporisateur, tout comme les dépôts des tuyaux d'admission, d'évacuation et des sièges des soupapes et de ces dernières (fig. 9) ne sont, pratiquement, pas influencés par le changement du combustible.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul IV, 1954

TERMOENERGETICĂ

CĂLDURA REALĂ DE VAPORIZARE A APEI DIN LIGNIT

DE

D. BUIMOVICI

Căldura de vaporizare a apei din cărbunele natural este o mărime care participă în majoritatea calculelor diferitelor procese de utilizare a cărbunelui. Astfel, în cazul arderii cărbunelui în diverse instalaţii, a uscării lui prealabile, în diferitele procese tehnologice de înobilare sau chimizare, în sfîrşit în cazul determinării puterii calorifice inferioare a cărbunelui, căldura de vaporizare a apei din cărbune este unul din cele mai importante elemente ale calculului, în acelaşi timp determinînd în mare măsură rentabilitatea instalaţiei sau procesului respectiv.

În toate aceste calcule valoarea căldurii de vaporizare este luată din tabelele vaporilor de apă, în funcţie de temperatură. Prin aceasta se acceptă în mod tacit, că pentru vaporizarea apei din cărbune este necesară aceeaşi cantitate de căldură, ca şi în cazul cînd această cantitate de apă s-ar găsi în stare liberă, de exemplu, într-un rezervor. O asemenea presupunere nu corespunde însă realităţii.

Din punctul de vedere al legăturii sale cu cărbunele [1], apa din cărbune se împarte în apă de îmbibaţie şi apă de adsorbţie. Apa de îmbibaţie, pe care cărbunele o poate căpăta doar în urma unui contact direct cu apa, umple macrocapilarele cărbunelui, nefiind supusă însă vreunei acţiuni din partea acestuia din urmă, aşa încît pentru vaporizarea apei de îmbibaţie va fi necesară acea cantitate de căldură, care este indicată de tabelele vaporilor de apă. Dar apa de îmbibaţie se vaporizează foarte repede, aşa încît în mod practic se poate accepta că chiar în cazul folosirii sale la locul de extragere, cărbunele nu mai posedă apa de îmbibaţie.

Apa de adsorbţie poate fi căpătată de cărbune sub formă de vapori direct din atmosferă, ca urmare a procesului de adsorbţie. Apa de adsorbţie, găsindu-se sub formă de strat adsorbit pe pereţii capilarelor şi sub forma apei condensate în capilare, este supusă unor forţe moleculare suplimentare, provenite din partea pereţilor capilarelor. Rezultă că pentru vaporizarea apei de adsorbţie (care constituie în mod practic umiditatea de lucru a cărbunelui natural) va fi nevoie de un consum mai mare de căldură, decît cel indicat în tabelele de aburi. Cantitatea suplimentară de căldură va fi cheltuită pentru învingerea forţelor moleculare adsorbtive.

Problemei determinării căldurii reale de vaporizare a apei din cărbunele natural, nu i s-a acordat atenţia cuvenită. În singura lucrare în care se aminteşte de această problemă, în articolul lui A. W. Gauger şi I. Lavine din 1930 [2], este efectuat calculul căldurii reale de vaporizare a apei dintr-un cărbune brun american de la 40 % umiditate pînă la 10 % umiditate (la masa uscată). Este de neînţeles de ce

autorii s-au oprit la limita inferioară de 10 % umiditate şi nu au efectuat calculul pînă la sfîrşit, pînă la uscarea completă. Tocmai în această regiune, de la 10 % şi pînă la 0 % umiditate, după cum se va vedea din cele ce urmează, au loc cele mai ridicate valori ale căldurii de vaporizare. Probabil că neînsemnata diferenţă (3 %) între valoarea medie a căldurii reale de vaporizare şi valoarea obişnuită a căldurii de vaporizare (luată din tabele), diferenţă căpătată de autorii susmenţionaţi în intervalul de la 40 % umiditate şi pînă la 10 % umiditate, explică lipsa de interes ce s-a arătat faţă de această problemă.

În articolul de faţă s-a urmărit a se arăta că diferenţa sus amintită capătă valori îndeajuns de mari, de care trebuie să se ţină seama în calculele tehnice. Ţinem să precizăm totuşi că nu s-a avut în vedere să se dea soluţia completă acestei chestiuni. Aceasta ar necesita o lucrare dedicată studiului determinării căldurii reale de vaporizare a apei din cărbune în funcţie de diferiţi factori, în primul rînd de temperatură. În lucrarea de faţă problema a fost rezolvată doar în intervalul îngust de temperatură de la 0°C—20°C.

Necesitatea unei mari cheltuieli de căldură pentru vaporizarea apei din cărbune este condiţionată de interacţiunea forţelor moleculare (Van der Waals) între adsorbent (cărbune) şi substanţă adsorbată (apă). Numai în ultimii 30 de ani fizica teoretică a început să explice natura forţelor moleculare, care sînt de fapt rezultantele cîtorva componente. Neglijînd acele componente, pentru care energia de interacţiune variază proporţional cu r^{-8} (r reprezintă distanţa între centrele a doi dipoli), ca de exemplu energia de respingere sau energia de atracţie între cvadripolul unei molecule şi momentul indus al dipolului altei molecule, trebuie ţinut seama de următoarele trei componente, în general numite efecte, pentru care energia de interacţiune variază proporţional cu r^{-6}.

a) Efectul de orientaţie, ca rezultatul interacţiunii momentelor dipolice ale moleculelor.

b) Efectul de inducţie, care ţine seama de variaţia (deformarea) momentului dipolic a unei molecule sub influenţa cîmpului altei molecule.

c) Efectul de dispersie, ca rezultat al inducţiei provenită din oscilaţiile electronilor.

Efectul de inducţie joacă un rol neînsemnat. Pentru majoritatea substanţelor predomină efectul de dispersie. În schimb, pentru moleculele care au un moment dipolic mare predomină efectul de orientaţie. Apa face parte din această ultimă categorie, fiind chiar unul din reprezentanţii ei cei mai tipici. Astfel energia de orientaţie a apei este aproximativ de patru ori mai mare decît energia de dispersie şi aproximativ de 19 ori mai mare decît energia de inducţie. Concluziile căpătate în urma studiului altor substanţe, trebuie să fie aplicate cu mare prudenţă în cazul apei. O asemenea prudenţă este mai ales valabilă pentru cazul variaţiei căldurii de vaporizare a apei din cărbunele natural în funcţie de temperatură. Efectul de orientaţie scade sensibil prin ridicarea temperaturii, deoarece intensificarea mişcării moleculare împiedică orientaţia dipolilor.

A. S. Coolidge [3] a calculat căldurile de adsorbţie ale vaporilor de apă de către cărbune activ şi prin ridicarea temperaturii cu 200°C a căpătat valori de două ori mai mici. Nu se poate indica în mod sigur în ce măsură o asemenea micşorare a căldurii de vaporizare ar corespunde şi cărbunilor naturali. O asemenea micşorare este totuşi puţin probabilă, ţinîndu-se seama că izotermele cărbunelui activ obţinute de Coolidge, care sînt convexe în regiunea valorilor mici ale presiunii parţiale a vaporilor de apă şi concave în regiunea valorilor mari ale presiunii parţiale, diferă esenţial de izotermele cărbunelui natural, pentru care conve-

xitatea şi concavitatea sînt situate invers. Problema variaţiei căldurii reale de vaporizare a apei în funcţie de temperatură este încă nerezolvată pentru cazul cărbunilor naturali.

★

Căldura diferenţială de desorbţie *) se defineşte ca fiind cantitatea de căldură necesară pentru desorbţia unei cantităţi anumite de substanţă adsorbată şi în general capătă simbolul q_d. Expresia matematică a căldurii diferenţiale de adsorbţie este

$$q_d = \frac{dq}{da},$$

unde dq reprezintă cantitatea de căldură în calorii iar da, cantitatea de substanţă desorbată în grame.

În cazul cînd desorbţia are loc la temperatură constantă, în afară de căldura q_d este necesar de a se mai comunica căldură şi pentru producerea lucrului mecanic pdv, unde dv este volumul cantităţii desorbite de gaz sau de vapori.

În conformitate cu legea gazelor perfecte, se poate scrie

$$pdv = RTda.$$

Cantitatea totală de căldură $q = q_d + RT$ se numeşte în chimia fizică «căldura izotermică de adsorbţie», iar în termotehnică poartă denumirea de «căldură de vaporizare». Pentru determinarea valorii ei poate fi aplicată fie metoda experimentală, fie metoda de calcul.

Metoda experimentală se reduce la determinarea căldurii de vaporizare într-un calorimetru. Pentru a se păstra temperatura invariabilă trebuie folosit sau un calorimetru cu volum mare, sau un calorimetru de tip Bunsen, cu topirea ghеţei. Prin experimentare nu este posibil de a se determina în ce măsură căldura din calorimetru se transformă în lucru mecanic de desorbţie (pentru amănunte a se vedea S, Brunauer [4]), de aceea rezultatele obţinute vor fi situate între valorile b_d şi q, ceea ce reduce exactitatea metodei experimentale.

Metoda de calcul posedă aproximativ acelaşi grad de exactitate ca şi metoda experimentală. Ea se bazează pe ecuaţia lui Clapeyron-Clausius, prin ajutorul căreia se poate determina cantitata necesară de caldură pentru trecerea unui corp dintr-o stare în altă stare de agregare.

$$\frac{dP}{dT} = \frac{q}{Tdv}, \tag{1}$$

unde q reprezintă efectul termic corespunzător;

dv, variaţia volumului în procesul respectiv;

p, T, presiunea şi temperatura.

În cazul vaporizării $dv = v_2 - v_1$, unde

v_2 reprezintă volumul specific al aburului;

v_1 volumul specific al lichidului.

Volumul lichidului este neglijabil de mic faţă de volumul aburului, de aceea se poate considera $dv = v_2$.

*) În general este întrebuinţat termenul «căldura de adsorbţie» şi nu de desorbţie pentru că în chimia fizică se lucrează întotdeauna cu corpuri în prealabil supuse completei degazări, pentru care procesul principal va fi adsorbţia.

Admiţînd că vaporii de apă se conformă logii gazelor ideale, se poate scrie

$$v_2 = \frac{RT}{P}$$

şi ecuaţia lui Clapeyron-Clausius se transformă în

$$\frac{d\ln P}{dT} = \frac{q}{RT^2} \quad \text{sau} \quad d\ln P = \frac{q}{R}\frac{dT}{T^2}.$$

Presupunînd că q este constant într-un interval limitat de temperatură (cîteva zeci de grade), ecuaţia de mai sus poate fi integrată de la T_1 la T_2

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{q}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right),$$

unde pentru o cantitate determinată de substanţă adsorbită P_1 şi P_2 vor fi presiunile absolute ale aburului, corespunzătorare temperaturilor T_1 şi T_2.

Rezolvînd ecuaţia în funcţie de q se capătă

$$q = 2{,}303\ R\frac{T_2T_1}{T_2 - T_1}\lg\frac{P_2}{P_1} = K\lg\frac{P_2}{P_1}, \qquad (2)$$

unde

$$K = 2{,}303\ R\frac{T_2T_1}{T_2 - T_1}. \qquad (3)$$

Pentru cazul studiat în lucrarea de faţă, adică pentru vaporizarea apei din cărbunele natural în intervalul de la 0°C pînă la 20°C

$$R = \frac{1{,}986}{18{,}016} = 0{,}1102\ \frac{\text{cal}}{\text{g·grad}}$$

$$T_1 = 273{,}2°\text{K};\quad T_2 = 293{,}2°\text{K}$$

şi constanta K capătă următoarea valoare numerică

$$K = 2{,}303 \times 0{,}1102 = \frac{293{,}2 \times 273{,}2}{293{,}2 - 273{,}2} = 1003{,}158 \simeq 1003\ \frac{\text{cal.}}{\text{g}}.$$

Folosirea metodei de calcul implică determinarea pentru două temperaturi a izotermelor de adsorbţie a vaporilor de apă din substanţa studiată.

Pentru calculul efectuat au fost folosite o serie de izoterme de adsorbţie, determinate în cadrul unei lucrări, care va fi publicată ulterior. În prezenta lucrare vor fi indicate în mod sumar, metoda şi datele numerice necesare.

Au fost studiate trei probe de lignit din R.P.R., din zăcămintele situate în regiunea subcarpatică, pe care le însemnăm cu simbolurile I, II şi III.

În tabloul nr. 1 sînt date caracteristicile tehnice ale ligniţilor studiaţi.

Izotermele de adsorbţie au fost determinate în prezenţa aerului, în exsicatoare, în care diferitele umidităţi relative ale aerului erau creiate prin amestecurile corespunzătoare ale acidului sulfuric cu apă. Au fost determinate două serii de izoterme, la temperaturile 20° şi 0°C. Exsicatoarele erau menţinute în termostate, unde variaţiile de temperatură nu depăşeau cîteva sutimi de grad. Pentru a se înlătura principalul dezavantaj al metodei determinării izotermelor de adsorbţie în prezenţa aerului, anume timpul foarte îndelungat, necesar pentru determinarea stării

de echilibru (cîteva luni) s-a imaginat un sistem de agitare a aerului în interiorul exsicatorului, păstrîndu-se în acelaşi timp cea mai riguroasă etanşeitate *).

Tabloul nr. 1

		Lignit I	Lignit II	Lignit III
1	Umiditatea totală	38,5 %	32,2 %	28,5 %
2	Conţinut de cenuşă la masa uscată .	43,34 %	52,74 %	63,82 %
3	Conţinut de materii volatile la masa combustibilă	56,26 %	52,21 %	62,23 %
4	Conţinutul total de sulf	1,95 %	3,03 %	2,2 %
5	Puterea calorifică inferioară	1962 $\frac{kcal}{kg}$	1622 $\frac{kcal}{kg}$	1104 $\frac{kcal}{kg}$

În felul acesta se înlătură concentraţia neuniformă a vaporilor de apă în spaţiul exsicatorului şi se creează condiţii pentru intensificarea difuziei moleculelor vaporilor de apă între adsorbant (lignit) şi aerul din exsicator. Prin agitarea aerului, timpul necesar stabilirii stării de echilibru a fost redus de la cîteva luni la 12—14 zile.

Probele de lignit, în greutate de aproximativ 1 g se aflau în fiole de sticlă, care erau cîntărite la fiecare 3—4 zile. Starea de echilibru era considerată stabilită, dacă după 3—4 zile variaţia de greutate nu depăşea 0,0004 g. În cele mai multe cazuri, greutatea probei rămînea constantă.

În experienţele executate, curbele de desorbţie au fost determinate cu probe de lignit ce conţineau iniţial atît apa de adsorbţie, cît şi apa de îmbibaţie, cu scopul de a se obţine condiţii cît mai apropiate de practică, cînd lignitul scos din mină conţine în general ambele feluri de apă.

În tabloul nr. 2 sînt date rezultatele determinărilor izotermelor de desorbţie la temperaturile de 20° şi 0°C pentru cei trei ligniţi studiaţi, după care au fost construite diagramele din figurile 1, 2 şi 3.

Tabloul nr. 2

Presiunea relativă a vaporilor de apă	Umiditatea la masa uscată t = 0°C			Presiunea relativă a vaporilor de apă	Umiditatea la masa uscată t = 20°C		
	Lignit I	Lignit II	Lignit III		Lignit I	Lignit II	Lignit III
%	%	%	%	%	%	%	%
100	42,80	37,0	34,90	100	26,3	27,1	25,9
85,75	20,12	26,45	21,56	89,37	21,95	23,25	20,78
77,36	21,95	20,18	16,88	76,28	15,44	17,12	14,38
64,47	13,97	13,86	11,97	60,76	11,06	12,08	9,87
51,20	10,43	10,70	8,86	51,51	9,21	9,73	7,97
40,04	8,81	8,76	7,11	42,44	7,68	7,97	6,52
21,23	6,45	6,25	4,86	31,74	6,04	6,18	4,93
12,94	4,92	4,72	3,52	22,44	4,84	4,95	3,76
6,75	2,81	3,33	2,41	14,91	3,82	3,64	2,90
—	—	—	—	6,62	2,30	2,15	1,58

*) Mai amănunţit despre această metodă experimentală de determinare a izotermelor de adsorbţie se va publica într-o lucrare ulterioară.

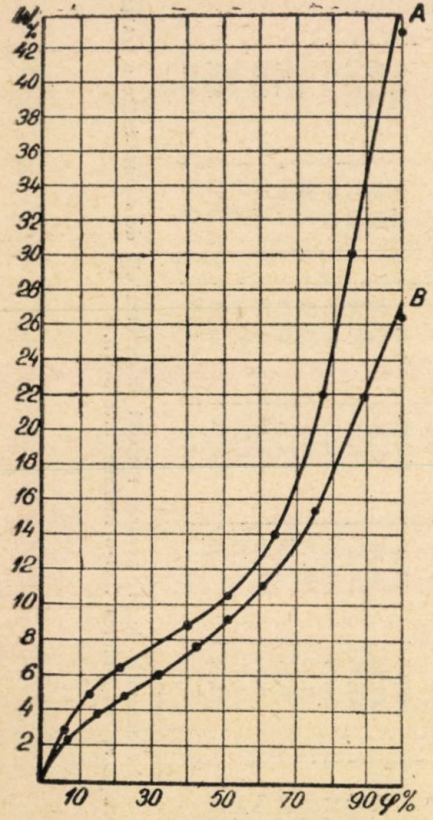


Fig. 1. — Izotermele de desorbție. Lignit I. A = la 0°C, B = la 20°C.

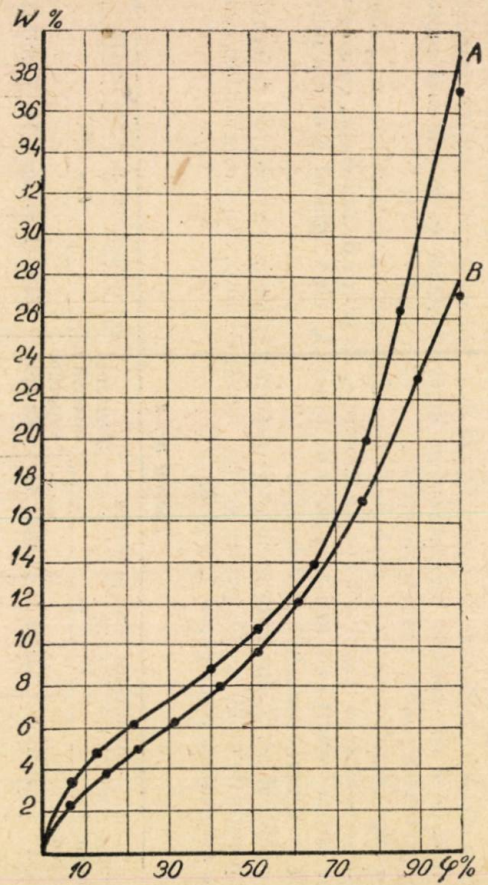


Fig. 2. — Izotermele de desorbție. Lignit II. A = la 0°C, B = la 20°C.

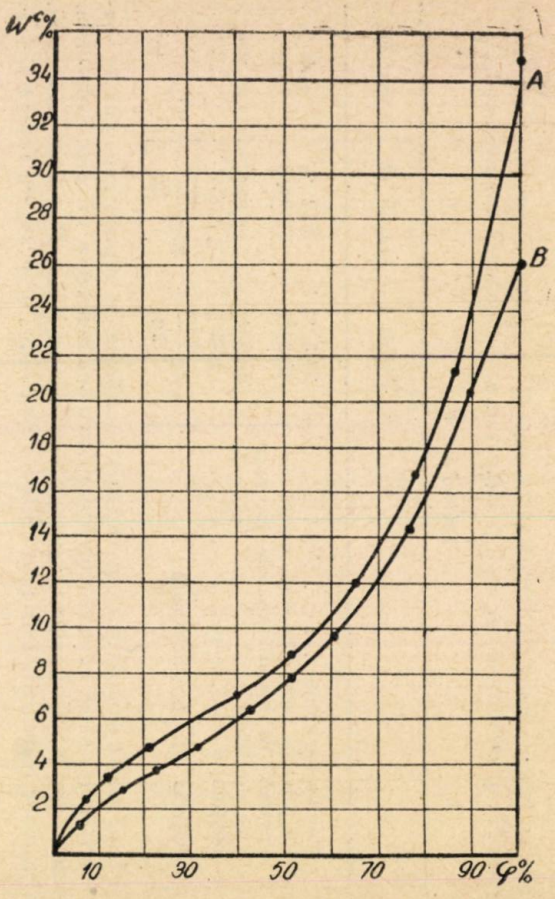


Fig. 3. — Izotermele de desorbție. Lignit III. A = la 0°C, B = la 20°C.

Pe izotermele din figurile 1, 2 şi 3 pentru o anumită umiditate a lignitului au fost citite presiunile parţiale corespunzătoare ale vaporilor de apă (pentru ambele temperaturi), din care apoi au fost obţinute valorile presiunii absolute a vaporilor de apă, exprimate în mm Hg. Această operaţie a fost repetată pentru diferite umi-

Tabloul nr. 3

Lignit I

I	II	III	IV	V	VI
Umiditatea la masa uscată	Presiunea absolută a vaporilor de apă		Căldura de vaporizare	Creşterea căldurii de vaporizare în comparaţie cu valoarea obişnuită	
	la 20°C	la 0°C			
%	mm Hg	mm Hg	cal/g	cal/g	%
24	16,4	3,64	653	61	10,3
21	15,3	3,48	643	51	8,6
18	14,3	3,29	637	45	7,6
15	13,2	3,06	634	42	7,1
12	11,4	2,66	631	39	6,6
11	10,62	2,47	633	41	6,9
10	9,78	2,23	640	48	8,1
9	8,82	1,90	665	73	12,3
8	7,84	1,62	712	120	20,3
7	6,68	1,17	757	165	27,9
6	5,32	0,87	786	194	32,8
5	3,99	0,612	814	222	37,5
4	2,74	0,439	795	203	34,3
3	1,872	0,311	780	188	31,7
2	1,102	0,183	778	186	31,4
1	0,542	0,068	899	307	51,8

Tabloul nr. 4

Lignit II

I	II	III	IV	V	VI
Umiditatea la masa uscată	Presiunea absolută a vaporilor de apă		Căldura de vaporizare	Creşterea căldurii de vaporizare în comparaţie cu valoarea obişnuită	
	la 20°C	la 0°C			
%	mm Hg	mm Hg	cal/g	cal/g	%
24	16,1	3,79	627	35	5,9
21	14,9	3,60	618	26	4,4
18	13,7	3,37	610	18	3,0
15	12,4	3,06	606	14	2,4
12	10,7	2,62	610	18	3,0
9	8,42	1,92	645	53	9,0
8	7,92	1,56	683	91	15,2
7	6,47	1,24	718	126	21,3
6	5,30	0,916	761	169	28,6
5	4,11	0,65	800	208	35,2
4	2,98	0,41	857	265	44,7
3	1,96	0,247	900	308	52,1
2	1,10	0,128	934	342	57,9
1	0,433	0,0412	1027	435	73,5

dităţi ale lignitului. Caldura reală de vaporizare (la 1 g apă vaporizată) era calculată după formula

$$q = 1003 \lg \frac{P_{20°C}}{P_{0°C}} \frac{\text{cal}}{\text{g}}. \qquad (4)$$

Tabloul nr. 5

Lignit III

Umiditatea la masa uscată	Presiunea absolută a vaporilor de apă		Căldura de vaporizare	Creşterea căldurii de vaporizare în comparaţie cu valoarea obişnuită	
	la 20°C	la 0°C			
%	mm Hg	mm Hg	cal/g	cal/g	%
24	16,7	4,07	613	21	3,5
21	15,7	3,87	607	15	2,5
18	14,6	3,63	604	12	2,0
15	13,65	3,34	610	18	3,0
12	12,15	2,95	615	23	3,9
9	9,99	2,37	624	32	5,4
7	8,31	1,79	666	74	12,5
6	6,82	1,35	703	111	18,8
5	5,60	1,03	734	142	24,0
4	4,12	0,72	757	165	27,9
3	1,80	0,452	792	200	33,8
2	1,57	0,21	875	283	47,9
1	0,63	0,0685	963	371	62,6

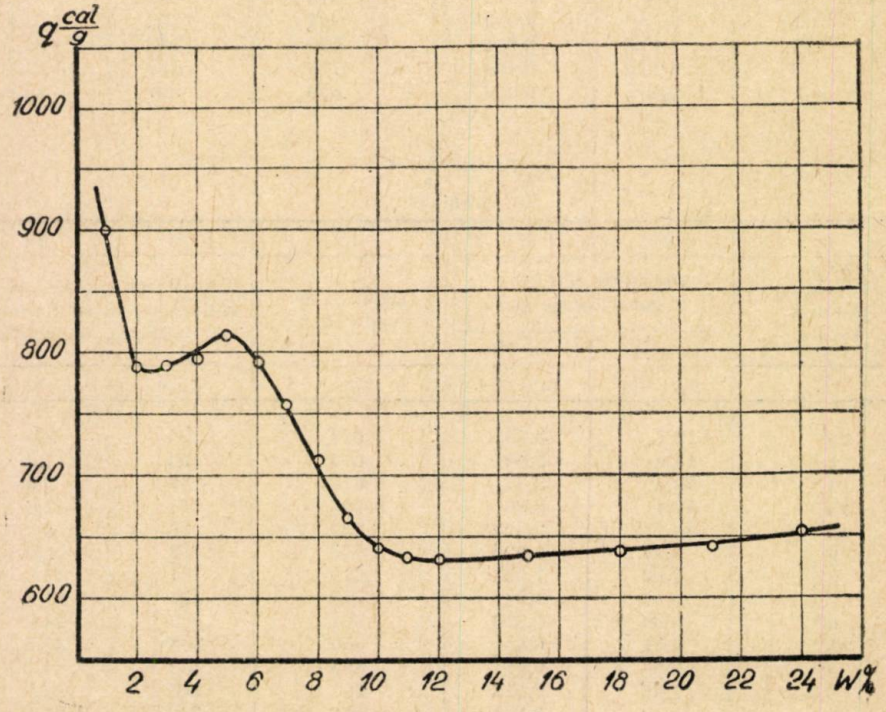


Fig. 4. — Lignit I.

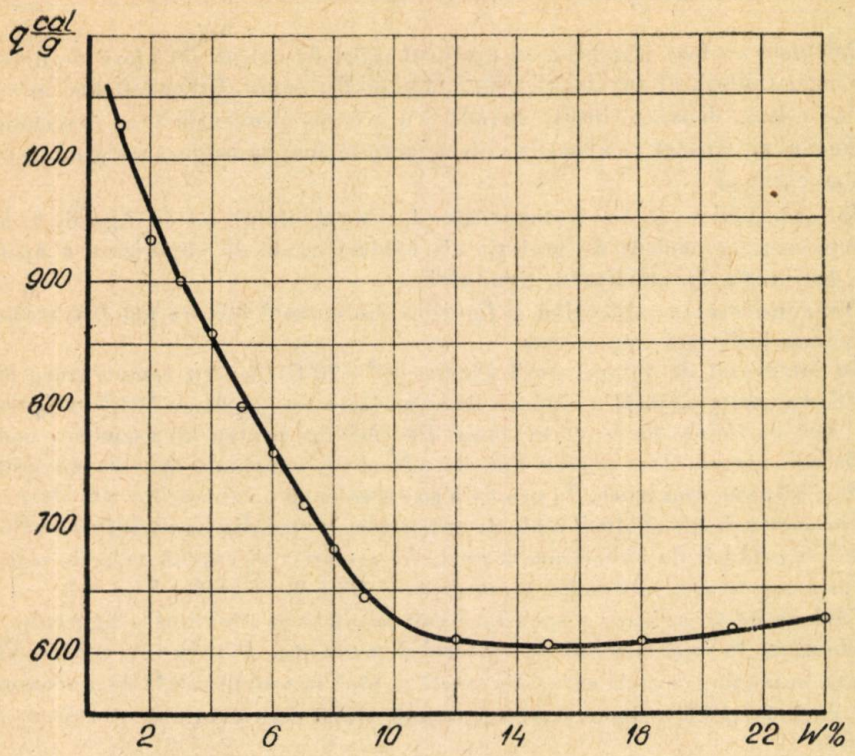


Fig. 5. — Lignit II.

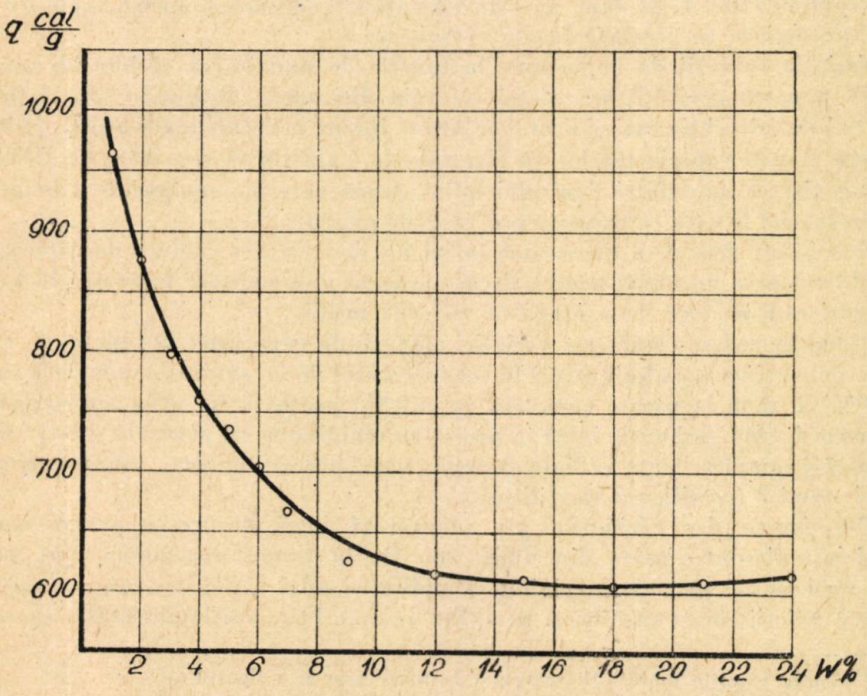


Fig. 6. — Lignit III.

Calculele au fost efectuate cu ajutorul riglei de calcul (în afară de determinarea logaritmilor), cu preciziunea pînă la al treilea semn. Un calcul mai minuţios ar fi de prisos, deoarece însăşi metoda (cu eroarea provenită prin determinarea izotermelor şi eroarea ce apare la citirea izotermelor) nu asigură un grad de exactitate mai ridicat.

În tablourile nr. 3, 4 şi 5 sînt strînse datele calculului, iar în figurile 4, 5 şi 6 sînt reprezentate curbele de variaţie ale căldurii reale de vaporizare a apei din lignit, în funcţie de umiditatea lignitului.

Din considerarea tablourilor şi figurilor din această lucrare pot fi trase următoarele concluzii mai importante.

În intervalul de temperatură studiat (0°—20°C) pentru temperatura medie de 10°C, valoarea normală a căldurii de vaporizare este egală cu 591,7 cal/g $\simeq$ 592 cal/g. Apa de îmbibaţie se va evapora din cărbune pentru un asemenea consum specific de căldură. Dar pentru apa de adsorbţie, consumul specific de căldură va fi întotdeauna mai mare. În cea de a şasea coloană a tablourilor sînt date creşterile procentuale ale căldurii reale de vaporizare a apei din lignit faţă de valoarea normală a caldurii de vaporizare a apei. Aceste creşteri capătă valorile cele mai mari prin evaporarea ultimului gram de apă (73,5 %, 62,6 %, 51,8 %).

Căldura de vaporizare a apei din lignit depinde de umiditatea lignitului. Dia gramele arată în mod concludent aspectul dependenţei. Pentru toţi cei trei ligniţi studiaţi, în porţiunea de la saturaţie totală şi pînă la umiditatea*) de aproximativ 11 %, curbele arată o descreştere monotonă, după care urmează o creştere pronunţată.

Curba lignitului I, spre diferenţă de celelalte, conţine un maximum şi un minimum suplimentar. Acest fapt nu este excepţional, deoarece curbele căldurii de adsorbţie deseori se prezintă foarte complicate.

Variaţia caldurii de vaporizare în funcţie de umiditatea cărbunelui este o dovadă a neomogenităţii suprafeţei acestuia din urmă. Regiunile suprafeţii cu potenţial de adsorbţie mai ridicat vor reţine intens moleculele adsorbite de apă, de aceea pentru vaporizarea lor va fi nevoie de o cheltuială mai mare de căldură. Neomogenitatea suprafeţei lignitului influenţează puternic comportarea lui generală, în special în ceea ce priveşte procesele de oxidare.

Este foarte greu de a ţine seama în calcule de creşterea căldurii de vaporizare (faţă de valoarea normală) pentru fiecare procent de umiditate în parte. În astfel de cazuri este necesar de a opera cu valorile medii.

Avînd în vedere caracterul variaţiei căldurii de vaporizare în funcţie de umiditate, determinarea valorii medii în tot intervalul de la saturaţie completă (φ = = 100%) şi pînă la uscare completă ($\varphi = 0$ %) poate să fie utilă numai pentru acele cazuri, cînd cărbunele intră în proces cu umiditatea lui naturală şi este expus unei uscări complete, cum ar fi de exemplu cazul arderii în focar sau a unei prelucrări termice (cocsificare, gazeificare).

Dar foarte des cărbunele sau semicocsul intră în proces numai atunci cînd deja a pierdut o parte din umiditate, fie în timpul depozitării sale, fie în urma unei uscări parţiale prealabile. Umiditatea unui astfel de cărbune variază în jurul valorii corespunzătoare, pe curba de desorbţie, presiunii relative de 60—

*) Toate valorile umidităţii se referă la masa uscată a lignitului.

65 % (umiditatea relativă normală a aerului). Pentru uscarea completă a unui astfel de cărbune în focar, într-un cuptor tehnologic, sau într-o instalaţie de uscat, valoarea medie a căldurii de vaporizare va fi diferită faţă de valoarea obişnuită.

În sfîrşit trebuie să se calculeze separat valoarea medie a căldurii de vaporizare în cazul uscării cărbunelui de la umiditatea lui naturală ($\varphi = 100\ \%$) pînă la umiditatea higrocospică ($\varphi = 65\ \%$).

În tabloul nr. 6 sînt date creşterile medii procentuale (în comparaţie cu valoarea normală a căldurii de vaporizare 592 cal/g) ale căldurii reale de vaporizare a apei, în intervalul de temperatură de la 0°C la 20°C, în funcţie de domeniul de uscare.

Tabloul nr. 6

Creşterea procentuală medie a căldurii reale de vaporizare a apei din lignit în comparaţie cu valoarea normală de 592 $\frac{cal}{g}$ (0°C—20°C)

	De la umiditatea adsorbtivă maximală ($\varphi = 100\ \%$) pînă la uscare completă ($\varphi = 0\ \%$)	De la umiditatea higrocospică ($\varphi = 65\ \%$) pînă la uscare completă ($\varphi = 0\ \%$)	De la umiditatea adsorbtivă maximală ($\varphi = 100\ \%$) pînă la umiditatea higrocospică ($\varphi = 65\ \%$)
Lignit I	16,7 %	28,8 %	8 %
Lignit II	16,4 %	37,5 %	3,75 %
Lignit III	12,0 %	26,9 %	3,0 %

Din tabloul nr. 6 reiese că pentru cel de al treilea domeniu de uscare, creşterile sînt mici, astfel încît ele pot fi neglijate.

Cu totul altfel este situaţia pentru celelalte două domenii. Creşterile medii, adică corecţiunile care trebuie să fie aduse în calcule, ajung pînă la valori de 27 %—37 % pentru cel de al doilea domeniu şi aproximativ 12—15 % pentru primul. Desigur că atît de mari corecţii trebuie neapărat introduse în calcule.

Pînă la noi determinări aceste corecţii pot servi cu suficientă precizie şi pentru temperaturi mai înalte (80—100°C). De asemenea aceste corecţii pot fi folosite cu titlul de orientare în calculele termice ale cărbunilor bruni inferiori.

ИСТИННАЯ ТЕПЛОТА ИСПАРЕНИЯ ВОДЫ, СОДЕРЖАЩЕЙСЯ В ЛИГНИТЕ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Установив опытным путем изотермы десорбции водяных паров трех образцов лигнита, добываемого в РНР, при температурах в 0 и 20°, автор вычислил по формуле Клапейрона-Клаузиуса истинные температуры испарения воды, содержащейся в лигните.

Расчет был произведен для всех стадий до полной сушки.

В конце настоящего сообщения автор указывает поправки, которые необходимо ввести в вычисления, в зависимости от сушки, настаивая на значении этих поправок для уточнения расчетов, в особенности для первых двух случаев сушки.

ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. — Изотермы десорбции лигнита I; *A* — при 0°, *B* — при 20°.
Рис. 2. — Изотермы десорбции лигнита II; *A* — при 0°, *B* — при 20°.
Рис. 3. — Изотермы десорбции лигнита III; *A* — при 0°, *B* — при 20°.
Рис. 4. — Лигнит I.
Рис. 5. — Лигнит II.
Рис. 6. — Лигнит III.

LA CHALEUR RÉELLE DE VAPORISATION DE L'EAU DU LIGNITE

(RÉSUMÉ)

Après avoir établi expérimentalement, aux températures de 0°C et 20°C, les isothermes de dessiccation des vapeurs d'eau sur trois échantillons de lignite de la République Populaire Roumaine, on a calculé, en se basant sur la formule de Clapeyron-Clausius, les chaleurs réelles de vaporisation de l'eau du lignite.

Le calcul a été effectué jusqu' à dessiccation complète. On recommande, à la fin de l'article, des corrections de calcul, en fonction du domaine de dessiccation. On fait ressortir l'importance de ces corrections pour la précision des calculs, surtout pour les deux premiers domaines de dessiccation.

EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — Isothermes de désorption. Lignite I. *A*, à 0°C; *B*, à 20°C.
Fig. 2. — Isothermes de désorption. Lignite II. *A*, à 0°C; *B*, à 20°C.
Fig. 3. — Isothermes de désorption. Lignite III. *A*, à 0°C; *B*, à 20°C.
Fig. 4. — Lignite I.
Fig. 5. — Lignite II.
Fig. 6. — Lignite III.

BIBLIOGRAFIE

1. G. Stadnikov, *Himia uglia*. Moscova, 1931.
2. A. W. Gauger, I. Lavine, Ind. Eng. Chem., 1930, t. 22, p. 1226.
3. A. S. Coolidge, J. Am. Chem. Soc., 1927, t. 49, p. 708 şi 1949.
4. S. Brunauer, *The Adsorption of Gases and Vapors*. New York, 1945.
5. A. I. Brodski, *Fiziceskaia himia*. Moscova, 1944, vol. 1.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul IV, 1954

NOTE

SCHEME RAŢIONALE PENTRU SISTEMELE DE TERMOFICARE A ORAŞELOR MARI ŞI A CENTRELOR INDUSTRIALE

DE

L. A. MELENTIEV, I. I. AGRACEV, G. B. LEVENTAL şi C. I. MICIURIN

„Izvestia Academii Nauc SSSR", Secţia ştiinţe tehnice nr. 4, 1952

Termoficarea definită ca producere combinată de energie electrică şi termică ocupă un loc de frunte în energetica sovietică, atît din punctul de vedere al raţionalei gospodăriri a combustibililor cît şi ca o metodă de îmbunătăţire a condiţiilor de trai şi de dezvoltare modernă a oraşelor.

Alimentarea cu căldură a oraşelor după schemele curente se face din centrale de termoficare situate în oraşe, alimentînd separat anumite cartiere şi avînd raza de acţiune limitată la 6—7 km.

O dezvoltare intensă în această direcţie prezintă însă şi dezavantaje, dintre care cele mai importante sînt:

1. Mărirea cantităţii de combustibil adusă în oraş, care este cu atît mai mare cu cît calitatea cărbunelui este mai slabă. În acest fel se încarcă reţeaua transporturilor şi se viciază atmosfera, mai ales atunci cînd combustibilul conţine sulf.

2. Construcţiile centralelor sînt mai scumpe, spaţiul fiind în genere limitat şi condiţiile de alimentare cu combustibil şi apă fiind grele. Din motivele de mai sus puterea centralelor de termoficare este limitată la 50 000—75 000 kW.

3. Se înrăutăţesc condiţiile de întocmire a planurilor de dezvoltare a oraşelor.

În lumina acestor constatări bazate pe o îndelungată experienţă în domeniul termoficării şi ţinînd seama de studii anterioare care constată posibilitatea tehnico-economică a construirii de centrale de termoficare situate în afara oraşelor, autorii propun o schemă pentru termoficarea oraşelor mari bazată pe următoarele două principii:

— căldura să fie transportată de la distanţe mari;

— centralele de termoficare să funcţioneze în paralel, acoperind o sarcină termică comună.

În continuare, articolul examinează noua propunere din toate punctele de vedere.

1. Premizele economice justifică scoaterea centralelor din incinta oraşelor. Costul specific, precum şi costul de exploatare sînt mai mici la centralele situate în afara oraşelor, avantajele menţinîndu-se pînă la distanţe de 25—30 km. Puterea corespunzătoare a centralelor situate în afara oraşelor va fi de peste 75 000—100 000 kW.

2. Se examinează apoi schemele centralei propriu-zise. Apare evident avantajul şi necesitatea de a trece la grupuri mari de termoficare de ordinul 50 000 kW, iar temperatura apei la plecare se va ridica de la valoarea curentă de 140°C la 170°—180°C.

Importantă este de asemenea alegerea sistemului de conducte. Prin sistemul monotubular, fără întoarcerea apei răcite, se obţin puteri electrice mai mari şi în acelaşi timp se utilizează căldura de potenţial scăzut evacuată prin condensator. În acest fel sistemul monotubular prezintă avantaje faţă de cel bitubular atunci cînd centrala este situată în afara oraşelor.

3. În ceea ce priveşte funcţionarea în paralel a centralelor de termoficare pe o sarcină termică comună, se arată că este o condiţie necesară pentru transportul de căldură la distanţe mari.

Efectele energetice şi economice ale acestei funcţionări sînt:

— posibilitatea reducerii maximului total teoretic al sarcinii termice;

— mărirea siguranţei de alimentare cu căldură, existînd posibilitatea alimentării zonelor separate cu căldură de la mai multe surse;

— folosirea economică a agregatelor de cazane în ce priveşte reviziile şi reparaţiile;

— folosirea raţională a turbinelor.

4. Se examinează legăturile termice între centralele de termoficare care funcţionează în paralel. Se arată că aceste legături se pot face pe două căi:

— crearea de legături termice în porţiunile periferice ale magistralelor care se întîlnesc şi au diametre variabile;

— crearea de legături termice prin interconectarea directă a colectoarelor de la termocentrale care funcţionează în paralel.

În concluzie, articolul insistă asupra faptului că scoaterea centralelor de termoficare în afara oraşelor reprezintă o nouă etapă necesară a termoenergeticei sovietice dar nu este numai o problemă de transport de căldură la distanţă. Ea pune problema funcţionării în paralel pe o sarcină termică comună a centralelor de termoficare, care impune scheme noi pentru sistemele de termoficare ale oraşelor mari.

Pentru viitor este necesar ca pe baza studiilor existente să se intensifice cercetările pentru transportul căldurii la distanţe foarte mari, de ordinul 100—150 km.

*

Problema tratată în articolul de faţă reprezintă una din problemele importante ale termoenergeticei sovietice actuale, cu atît mai mult cu cît, pe lîngă aspectul tehnic ea are şi aspectul de îmbunătăţire a condiţiilor de trai din oraşele termoficate cu centrale consumînd combustibil solid. Aici transporturile de cărbune şi cenuşe precum şi gazele de ardere evacuate prin coşuri pun probleme dificile pentru asigurarea higienii localităţilor respective.

Concluzia că centralele de termoficare situate la 25—30 km de oraşe asigură producerea de căldură şi energie în condiţii economice echivalente cu centrale situate în incinta oraşelor va duce desigur la realizări corespunzătoare în acest domeniu. Deatfel există şi propuneri mai complexe, după care termoficarea ar trebui combinată cu gazeificarea prealabilă, astfel că dintr-o aceeaşi centrală, centrele locuite s-ar putea alimenta la distanţă cu energie electrică, termică şi cu gaze.

Urmează a se examina, lucru propus şi de autorul articolului, care sînt căile de realizare practică a termoficării la foarte mare distanţă de 100—150 km.

În acest mod o centrală de termoficare situată «la gura uzinei» ar putea asigura consumarea, pentru termoficare, a combustibililor inferiori.

Pentru condiţiile din ţara noastră, problema are un interes deosebit căci există mai multe regiuni unde termoficarea la mare sau foarte mare distanţă ar rezolva complet problemele energetice, economice şi de bun trai.

Al. Mişu

NOTĂ ASUPRA CONSFĂTUIRII PRIVIND PROTECŢIA INSTALAŢIILOR ELECTRICE ÎMPOTRIVA SUPRATENSIUNILOR ATMOSFERICE.

Pe data de 29 decembrie 1953 din iniţiativa Consiliului Central ASIT, a avut loc o consfătuire privind protecţia instalaţiilor electrice împotriva supratensiunilor atmosferice, la care a fost invitat şi Institutul de energetică al Academiei R.P.R.

Consfătuirea a fost organizată din necesitatea de a clarifica şi a preciza o serie de probleme în legătură cu avariile şi deranjamentele suferite de instalaţiile electrice din regiunea petroliferă, datorită supratensiunilor atmosferice care au fost deosebit de intense şi frecvente în primăvara şi vara anului 1953. Totodată era necesar de a se face un schimb de experienţă între institutele de studii şi cercetări pe de o parte, şi întreprinderile de exploatare, pe de altă parte pentru ca din analizarea avariilor produse şi a fenomenelor care au dus la aceste avarii, să rezulte măsurile cele mai raţionale ce trebuie luate pentru îmbunătăţirea protecţiei împotriva supratensiunilor atmosferice.

La consfătuire au luat parte muncitorii, inginerii şi tehnicienii din centrele Tîrgovişte, Moroieni, Ploeşti şi Buzău.

În cadrul acestei consfătuiri s-au prezentat în total trei referate după care au urmat discuţii.

Dr. ing. A. Avramescu, delegatul M.E.E.I.E., a expus referatul *Supratensiuni atmosferice*, tratînd fenomenologia producerii acestor supratensiuni. După o introducere n care s-au expus consideraţiile generale privind natura supratensiunilor şi definirea lor, a rmează descrierea caracteristicilor trăznetului (trăznetul ca fenomen electric, harta kerau·nică a R.P.R.) pentru ca în continuare să se trateze fenomenele electrice provocate de trăznet pe linii şi în instalaţiile electrice. În ultima parte a referatului s-au descris aparatele de măsură şi înregistrare a supratensiunilor.

Ing. Drăgan Gleb, delegatul Institutului de energetică al Academiei R.P.R., în expunerea sa a tratat problema protecţiei instalaţiilor electrice împotriva supratensiunilor atmosferice. După ce în prima parte a expunerii a arătat care sînt principiile protecţiei instalaţiilor electrice împotriva supratensiunilor atmosferice, a dezvoltat în continuare protecţia contra loviturilor directe, protecţia liniilor electrice aeriene, protecţia staţiilor electrice, protecţia maşinilor electrice rotative.

În cadrul ultimului referat, ing. J. Gayraud, delegatul M.E.E.I.E., a prezentat problema supratensiunilor atmosferice în instalaţiile energetice ce deservesc industria de petrol în lumina cifrelor statistice. În cadrul acestui referat s-au dat o serie de date statistice, culese pe o perioadă de circa 10 ani asupra avariilor şi deranjamentelor suferite de instalaţiile electrice de înaltă şi joasă tensiune datorită supratensiunilor atmosferice.

După consfătuire au urmat discuţii şi întrebări pe marginea referatelor prezentate precum şi în legătură cu o serie de avarii constatate în instalaţiile electrice din regiunea petroliferă şi provocate de supratensiunile atmosferice. La întrebările puse au răspuns ing. A. Avramescu şi ing. Drăgan Gleb. Discuţiile care au urmat au fost deosebit de ample, ceea ce denotă interesul deosebit pe care l-au acordat inginerii şi tehnicienii, pro·

blemelor privind protecţia împotriva supratensiunilor atmosferice. În cadrul acestor discuţii a rezultat faptul că, deoarece instalaţiile electrice de joasă tensiune au de suferit într-o egală măsură în urma supratensiunilor atmosferice şi deoarece în cadrul consfătuirii nu s-a tratat această problemă, se impune ca să se organizeze o consfătuire care să aibă ca obiect protecţia instalaţiilor de joasă tensiune.

După consfătuire s-a încheiat un proiect de rezoluţie, în legătură cu măsurile ce se recomandă a se lua pentru îmbunătăţirea protecţiei instalaţiilor electrice împotriva supratensiunilor atmosferice.

Organizarea acestei consfătuiri a fost deosebit de utilă, ţinînd seama de importanţa problemei protecţiei instalaţiilor electrice din regiunea petroliferă împotriva supratensiunilor atmosferice, ceea ce s-a constatat dealtfel şi din discuţiile deosebit de ample care au urmat după expunerea referatelor. În urma acestor discuţii a rezultat necesitatea de a se continua, pe de o parte efectuarea de studii teoretice în cadrul institutelor de studii şi cercetări ştiinţifice pentru aprofundarea problemei supratensiunilor atmosferice din punct de vedere fenomenologic şi din punctul de vedere al mijloacelor de protecţie, iar pe de altă parte de a se urmări de către întreprinderile de exploatare, analizarea avariilor produse de aceste supratensiuni. Această consfătuire a dus la concluzia că în viitor este necesar de a se organiza mai multe consfătuiri de acest gen, permiţîndu-se în acest mod de a se menţine o legătură mai strînsă cu practica şi de a se comunica personalului tehnic din exploatare aspectul ştiinţific al problemei. În această privinţă şi îndeosebi din punctul de vedere al studiului teoretic al producerii supratensiunilor atmosferice şi al mijloacelor de protecţie, sarcina principală îi revine Institutului de energetică al Academiei R.P.R.

COMUNICĂRI ŢINUTE LA SECŢIILE INSTITUTULUI DE ENERGETICĂ ÎN ANUL 1953

SECŢIA ELECTROTEHNICĂ

C. Budeanu: *Ciocanul electric parametric, aparat reactiv şi deformant.*

I. Solomon: *O nouă metodă de producere a curenţilor sinusoidali.*

M. Marinescu: *Sisteme electromecanice oscilante de tip parametric — Pendulul parametric.*

A. Fransua: *Amplidina.*

G. Drăgan: *Protecţia instalaţiilor electrice contra loviturilor directe ale trăznetului.*

G. Drăgan: *Tendinţele actuale ale descărcătorilor tubulari.*

M. Marinescu: *O metodă grafico-analitică de calcul şi proiectare a ciocanului electric parametric.*

A. Popescu: *Microfon condensator în sistem de alimentare în înaltă frecvenţă.*

M. Bărgăuanu: *Alternatorul sinusoidal.*

C. Budeanu: *Funcţionarea unei supape electronice.*

I. Solomon: *Metoda tensiunilor de polarizare spontană.*

M. Marinescu şi M. Popov: *Asupra spectrului de curenţi în circuite cu inductanţă variabilă şi relaţiile energetice din aceste circuite.*

I. Solomon: *Metoda contraelectrodului cu rezistenţă variabilă.*

I. Solomon: *Metoda celor 4 electrozi pentru măsurarea rezistivităţii la mică adîncime.*

P. Dimo şi Fl. Manea: *Caracteristici $P = f(u)$ şi $Q = f(u)$ pentru diferiţi consumatori.*

A. Avramescu: *Calculul încălzirii unor bobine speciale.*

A. Avramescu: *Încălzirea şi răcirea blocurilor.*

C. Budeanu: *Aspectul general fizic al fenomenelor reactive electromagnetice.*

SECŢIA TERMOTEHNICĂ

St. Gheorghiu: *Exemplu concret de termoficare industrială.*

I. Saphier: *Principii pentru întocmirea bilanţurilor termice.*

I. Stăncescu: *Exemplu concret de termoficare urbană.*

I. Saphier, A. Vasilescu şi V. Pimsner: *Principiile care au stat la baza calculului şi realizarea practică a compresorului cu jet.*

D. Ştefănescu: *Clasificarea reţelelor termice.*

SECŢIA MAŞINI TERMICE

C. Aramă: *Studiul preliminar asupra trecerii pe gaz metan a motoarelor de autobuz.*

C. Aramă, V. Pimsner şi M. Blumenfeld: *Discuţia purtată în cadrul Academiei de Ştiinţe a U.R.S.S. asupra fazelor arderii în motoarele cu aprindere prin scînteie.*

SECŢIA ENERGETICĂ GENERALĂ

M. Bercovici: *Repartiţia optimă a sarcinilor între mai multe centrale electrice interconectate.*

A. Zeiger: *Comparabilitatea investiţiilor în sectorul energetic.*

I. S. ANTONIU şi HERMINA ALBERT, *Culegere de probleme de electrotehnică. (Chestiuni speciale)*. Ed. energetică de Stat, Bucureşti, 1953.

În cursul anului 1953 a apărut *Culegerea de probleme de Electrotehnică (Chestiuni speciale)* de Ion S. Antoniu şi Hermina Albert. Lucrarea constituie un volum de 296 pagini, bogat ilustrat cu un mare număr de figuri.

Această culegere de probleme se referă de fapt la programul celui de al treilea semestru de învăţămînt superior al electrotehnicei, predat de profesor inginer Ion S. Antoniu la secţiile de specialitate ale Facultăţilor de Energetică şi Electrotehnică în Institutul Politehnic Bucureşti.

Lucrarea este împărţită în 5 părţi şi anume:

Studiul circuitelor electrice în curent alternativ conţinînd 177 probleme.

Studiul regimului deformant, conţinînd 102 probleme.

Studiul regimului dezechilibrat, conţinînd 77 probleme.

Studiul regimului tranzitoriu, conţinînd 54 probleme.

Utilizarea calculului matricial în electrotehnică, conţinînd 40 probleme.

Numărul total al problemelor tratate în această culegere este astfel de 450.

Publicaţia începe printr-un breviar rezumînd proprietăţile teoretice esenţiale ale fiecăreia din cele cinci părţi ale întregii colecţii. Acest breviar este dezvoltat în 60 de pagini. Urmează enunţurile în 73 pagini şi apoi răspunsurile cu indicaţiile de rezolvare în 120 pagini.

Publicaţia este apoi completată cu trei anexe, conţinînd tabele de funcţii trigonometrice, exponenţiale şi hiperbolice, nomograme cît şi o corespondenţă pentru funcţii imagină şi original (transformarea Carson).

Întregul conţinut al acestei publicaţii este prezentat cu multă competenţă şi la un înalt nivel ştiinţific.

Breviarul atît prin extensiunea sa, cît şi prin felul cum e prezentat constituie un rezumat cu totul preţios al tuturor proprietăţilor teoretice care se încadrează în chestiunile speciale la care se referă această culegere de probleme.

Enunţurile sînt explicit prezentate şi însoţite de numeroase scheme.

Răspunsurile şi indicaţiile conţin de asemeni numeroase îndrumări de rezolvare, însoţite acolo unde e cazul de planşe, tabele de calcul etc.

În linii generale autorii au reuşit a releva prin această culegere de probleme aplicaţiile pe care le au în practică o serie de fenomene speciale care azi nu mai trebuie privite ca simple speculaţii teoretice.

Consideraţiile de circuite electrice cît şi fenomenele tranzitorii de dezechilibraj, deformante, sînt realităţi practice care au tendinţa de a se extinde simultan cu extinderea reţelelor de electrificare.

Cunoaşterea cît mai profundă a acestor fenomene sub aspectul realităţilor în practica exploatărilor, constituie o necesitate pentru ingineri şi tehnicieni. Acestei necesităţi de cunoaştere si de aprofundare a unor chestiuni foarte delicate din punct de vedere teoretic, dar de o deosebită actualitate în practică, se adresează cu mult succes *Culegerea de probleme de electrotehnică (Chestiuni speciale)*, întocmită de I. S. Antoniu şi Hermina Albert.

Această lucrare prin conţinutul ei, cît şi prin felul de prezentare, are un caracter cu totul original.

Necesitatea şi rolul acestei culegeri de probleme au fost de altfel dovedite şi prin faptul că, într-un timp record, această primă ediţie a şi fost epuizată.

O a doua ediţie a apărut în anul 1954, cu care ocazie s-au introdus importante completări în prezentarea acestei lucrări.

C. Budeanu

V. M. GORNŞTEIN, *Repartiţia optimă a sarcinilor pe centralele electrice interconectate.* Ed. energetică de Stat, Bucureşti, 1953.

Repartizarea sarcinilor pe diferite unităţi ale unei centrale sau pe centrale care lucrează în paralel se face în exploatare ţinîndu-se seama de numeroase criterii locale şi particulare, care se pot grupa în două categorii mari, după cum privesc siguranţa sau economia în exploatare. În practică se subliniază asigurarea continuităţii sarcinii şi de multe ori rutina şi comoditatea mai furnizează dispoziţii şi măsuri care nu rezistă la o analiză mai amănunţită. De aceea principiul economic este de obicei neglijat, dar chiar în caz contrar nu se cunosc în practică criteriile juste de repartizare optimă a sarcinii pe unităţi interconectate.

Cartea de faţă este o contribuţie extrem de utilă la lămurirea acestei probleme şi la stabilirea programului de funcţionare, ţinînd seama de economia maximă ce se poate realiza. Or, economiile, la unităţile mari funcţionînd continuu, sînt foarte importante.

După o introducere în care se delimitează domeniul tratat şi se precizează caracteristicile unităţilor, în primul capitol se dau noţiuni fundamentale şi teoretice asupra metodei de repartizare optimă a sarcinilor, denumită, just, metoda creşterilor relative egale. Se deduce apoi principiul metodei întîi pentru aproximaţia unor caracteristici de consum liniare, apoi pentru cazul general. Se aplică, dar din păcate nu se explică, metoda factorului lui Lagrange. Se arată cum se poate aplica metoda dedusă şi la caracteristici cu discontinuităţi.

Capitolul al doilea tratează pe larg caracteristicile cazanelor şi metodele de stabilire ale acestora din încercări şi măsurători. Se discută apoi aplicarea metodei creşterilor relative la cazane şi săli de cazane, ţinînd seama şi de variaţia calităţii combustibilului.

Se arată cum se pot deduce caracteristici medii pentru cazane de acelaşi fel şi pentru agregatele cu cazane, atunci cînd există sau nu există date suficiente din măsurători.

În definitiv rezultă metode practice pentru întocmirea curbei creşterilor relative ale sălii cazanelor. Influenţele calităţii combustibilului, sînt evidenţiate principial şi practic.

În capitolul al treilea se examinează caracteristicile turbogeneratorilor şi repartizarea optimă a sarcinilor în cazuri normale şi speciale, de exemplu la turbine cu reglaj de admisie, sau prelevări intermediare, la variaţii ale temperaturii apei de răcire, la turbine cu contrapresiune şi de termoficare. Evident că problema repartizării sarcinilor pentru aceste din urmă devine dificilă.

După studiile acestor cazuri speciale se arată cum se pot trasa caracteristicile rezultante ale sălii maşinilor în numeroase variante, dîndu-se şi exemple practice, calculate în detaliu, cu indicarea evidenţelor ce sînt de ţinut, exemple care se referă la grupuri generatoare tipizate în Uniunea Sovietică.

În capitolul patru se trece la repartizarea sarcinilor între centrale interconectate, expunîndu-se exemplul unui sistem, calculat complet. Plecînd de la curbele de sarcină şi de la condiţiile de exploatare date, se programează repartizarea optimă din oră în oră. Calculele sînt făcute pentru unele cazuri practice, astfel că procedeul apare cît se poate de clar în toate detaliile sale. Numeroase tablouri cu date ilustrează exemplul.

Capitolul cinci este dedicat determinării condiţiilor celor mai favorabile şi discuţiei oportunităţii pornirii şi opririi agregatelor în centrale, a repercursiunilor corespunzătoare asupra economiei generale, ţinînd seama de programul de mers al întregului sistem.

Se dau metode de calcul pentru aprecierea oportunităţii permise şi optime a agregatelor în sisteme mari şi mici. Aceste metode se aplică în detaliu unor exemple din exploatare.

În capitolul şase se tratează influenţa consumului propriu asupra repartiţiei sarcinilor, utilizîndu-se pe o scară largă tabele. Consumul propriu se împarte în categorii, după destinaţie, durata de utilizare şi influenţa asupra creşterilor relative de consum ale centralelor urmînd îndeaproape recomandările oficiale ORGRES din 1944. În curbele caracteristice ale centralelor se introduc, după anumite principii, corecţii pentru a lua în considerare consumul propriu al unităţilor, ţinînd seama de regimul pompelor de alimentare, de condensat, a ventilatoarelor etc. Cu toate că şi acest capitol tratează problemele în amănunt, nu reuşeşte a cuprinde toată problematica ce poate să apară în diferite cazuri ale unor centrale sau sisteme reale.

Capitolul şapte se referă la repartizarea sarcinilor în cazuri speciale, anume în cazul insuficienţei combustibilului la o centrală, sau în cazul unui consum de combustibil impus. Principiile se ilustrează cu exemplele calculate în capitolele precedente.

În capitolul opt se stabilesc programe pentru hidrocentrale de diferite categorii, interconectate cu centrale termice, plecînd de la caracteristicile turbinelor, regimul de apă şi caracteristicile căderii şi volumul lacurilor de acumulare.

Ultimul capitol evidenţiază influenţa pierderilor în reţele asupra repartiţiei sarcinilor pe diferite centrale şi grupuri de centrale electrice. Pentru deducerea principiilor de repartizare se face din nou apel la metoda coeficientului lui Lagrange, rezultînd anumite corecţii la metoda generală în funcţie de complexitatea reţelei. Acest capitol este deosebit de interesant dat fiind că se ţine seama de rolul puterii reactive în reţea.

Cartea se adresează înainte de toate inginerilor şi tehnicienilor din exploatare. Deducerile matematice nu sînt prezentate riguros, în schimb condiţiile ce se întîlnesc în practica exploatării sînt detaliate şi discutate din toate punctele de vedere.

Astfel în capitolul întîi şi nouă deducerea metodei creşterilor relative nu este convingătoare nici pentru acei care cunosc problema. Cu atît mai puţin poate fi pentru majoritatea inginerilor şi tehnicienilor din exploatare. Or, explicitarea deducerii şi ilustrarea rezultatelor pe baza unor raţionamente logice simple este de cea mai mare importanţă pentru ca metoda creşterilor relative să fie bine înţeleasă, deoarece această metodă nu este numaidecît plauzibilă şi în orice caz nu se obţine pe o cale simplă.

În contrazicere cu uşurinţa cu care autorul a trecut peste motivarea metodei juste de repartizare a sarcinilor, aplicarea metodei se face cu o minuţiozitate şi trecere în detaliu remarcabilă. Se iau în considerare aproape toate cazurile care pot interveni în exploatare practică.

Se vede că autorul a făcut studii întinse în sisteme energetice, deoarece exemplele practice prezentate sînt detaliate pînă în amănunte, varietatea condiţiilor corespunzînd cazurilor întîlnite în realitate.

Cartea poate contribui în mod eficace la introducerea unor procedee ştiinţifice pentru repartizarea sarcinilor pe unităţi şi pe centrale interconectate, în vederea realizării unor importante reduceri de cheltuieli, care vor reveni economiei naţionale şi vor contribui la mărirea producţiei.

A. Avramescu

I. L. KAGANOV, *Mutatori electronici şi ionici*. Ed. energetică de Stat, Bucureşti, 1953.

Această lucrare constituie prima parte a cursului ţinut de I. L. Kaganov, *Bazele electronicei industriale*. Cartea are un conţinut bogat şi variat, autorul punîndu-şi drept scop să trateze într-un limbaj succint atît electronica sistemelor de comandă şi măsuri cît şi electronica energetică. Datorită acestui cuprins amplu, cartea dobîndeşte un caracter general, multe din aplicaţiile electronicii industriale, şi nu din cele mai puţin importante, fiind amintite fugitiv. Poate acest lucru ar influenţa negativ pe cititor care ar putea pune pe acelaşi plan de importanţă un fazmetru electronic şi o călire superficială în înaltă frecvenţă.

Într-un prim capitol se tratează teoria generală a redresării după care urmează capitole ca: redresori semiconductori, tuburi electronice, amplificatori, generatori, celule fotoelectrice şi tuburi catodice.

Autorul expune astfel într-un mod sistematic şi limpede redresarea monofazată, trifazată în diferite scheme standard, dă numeroase grafice utile unei proiectări nelaborioase. Din capitolele următoare cum sînt cele ale redresorilor uscaţi şi tuburilor electronice se desprinde accentul deosebit care se pune pe explicarea fenomenului fizic, al conductibilităţii semiconductorilor şi al emisiei termoelectronice. După studierea diferitelor fenomene ce au loc în tuburile electronice şi ionice, a diferiţilor parametri şi caracteristici, se trece la aplicaţiile imediate: electronica liniară. Se tratează astfel diferite tipuri de amplificatori inclusiv amplificatorii de impulsuri şi cei sensibili la fază. În acelaşi capitol sînt introduse alte aplicaţii ale tuburilor electronice la relee, stabilizatori, aparate de măsură etc.

Capitolul generatorilor electronici este şi el destul de bogat, cuprinzînd oscilatorii LC, RC, de impulsuri, de relaxare, de unde ultrascurte folosind clistronul şi magnetronul. Capitolul se încheie cu modulaţia. În aceste două ultime capitole, autorul dă numeroase exemple de calcul de amplificatori şi oscilatori, utile desigur pentru însuşirea metodei de proiectare.

În fine urmează un capitol despre celule fotoelectrice şi altul despre tuburi catodice şi aplicaţiile lor. Pe lîngă explicarea fenomenului fizic se enumeră numeroase aplicaţii importante ale acestor tuburi care au mărit puterea de cercetare a ştiinţei (osciloscraf catodic, microscop electronic, betatron etc.) sau constituie un pas în progresul tehnic de măsurare a mărimilor neelectrice cu ajutorul mărimilor electrice (fotometru, pirometru, analizor fotospectral).

În concluzie se poate spune, așa după cum reiese și din introducerea autorului, că lucrarea se poate considera drept o carte sinoptică a electronicei industriale; ea nu poate folosi decît pentru o primă cunoaștere a acestei discipline; un studiu mai aprofundat se poate baza pe folosirea bunăoară a bibliografiei indicată de autor.

Aceasta nu scade din valoarea cărții, care prin unitatea ei, în ciuda diversității cuprinsului, și datorită expunerii care îmbrățișează întreaga esență a fenomenelor, eliminînd doar amănuntele minore, este deosebit de utilă inginerilor de specialitate și chiar inginerilor din ramuri de activitate învecinate.

M. Racoviță

A. S. GORȘKOV, *Indicii tehnico-economici ai centralelor termoelectrice*. Ed. energetică de Stat, București, 1953.

De la început trebuie accentuat că lucrarea lui A. S. Gorșkov, care se ocupă de problemele de normare, calcul și analiză a bilanțurilor energetice și de indicii tehnico-economici ai centralelor termoelectrice, poate fi considerată ca una din cele mai interesante lucrări ce putea apare acum în domeniul energetic în țara noastră, adică într-o epocă în care trebuie ameliorată la maximum exploatarea centralelor electrice existente și pregătită și organizată temeinic, exploatarea marilor centrale termoelectrice intrate recent în funcțiune sau încă în curs de construcție în cadrul planului de electrificare a R.P.R.

Materia, care valorifică vasta experiență a autorului dintr-o îndelungată practică în acest domeniu, este grupată în trei părți, conținînd în total 21 de capitole.

Partea I-a (9 capitole) tratează instalațiile din sala mașinilor centralelor termoelectrice, analizînd bilanțurile energetice atît ale grupurilor cu condensație cît și ale celor de termoficare — lucrînd în contrapresiune sau în regim de condensație și cu prize reglabile — și urmărind influența condițiilor de lucru și a abaterilor valorilor parametrilor principali de la condițiile de regim asupra economiei instalațiilor.

Partea a II-a (7 capitole) este dedicată sălii de cazane a centralelor termoelectrice. Se face analiza bilanțului energetic în regim permanent și intermitent de funcționare; se stabilesc bazele pentru fixarea și normarea datelor caracteristice de funcționare ale cazanelor și se cercetează influența calității combustibilului asupra indicilor de funcționare.

Prin examinarea bilanțurilor energetice a trei cazane diferite, se dă posibilitatea urmăririi în paralel pe bază de cifre de exploatare, a comportării acestor instalații.

În partea a III-a se analizează problemele complexe și mai puțin cunoscute ale funcționării întregii centrale în ansamblul ei, precum și metodele de normare ale consumului specific de combustibil al întregii centrale.

Autorul acordă multă atenție nu numai urmăririi funcționării fiecărei unități ci și funcționării întregii centrale în condițiile reale de exploatare, adică cu sarcini variabile și dă în această privință un material prețios, ilustrat cu multe exemple de modul cum trebuie făcute calculele și urmăriți indicii tehnico-economici în toate fazele interdependente ale procesului de exploatare. În acest fel autorul demonstrează foarte convingător necesitatea fixării unor norme juste pentru indicii tehnico-economici pentru orice condiții de exploatare a agregatelor. Prin faptul că se prezintă scheme de structură și scheme ale legăturilor reciproce între diferitele elemente ale instalațiilor, se scoate în evidență foarte clar independența diverșilor parametri ai exploatării, dintre care unii la o primă examinare ar părea independenți. În această privință este de relevat schema din figura 11—2 care arată scăderea indicilor de funcționare a întregii centrale datorită aspirării unei cantități prea mari de aer în focarul unui cazan.

Modul în care este prezentat materialul nu are numai importanță din punctul de vedere al metodelor recomandate pentru fixarea, normarea și controlul indicilor tehnico-economici, ci oferă în același timp elemente a căror cunoaștere de către inginerii și tehnicienii din exploatare va contribui mult la ameliorarea funcționării unităților.

Numeroasele exemple luate din practică sînt foarte grăitoare, cea mai mare parte însă se referă la un echipament existent mai de mult în exploatare, astfel încît lipsesc cifre în legătură cu utilajul modern fabricat în ultimul timp și care a fost de exemplu livrat pentru noile centrale din R.P.R. Acest lucru nu afectează însă valoarea metodelor expuse și face numai să regretăm că nu posedăm de pe acum cifre și pentru unitățile ce lucrează sau urmează a lucra în centralele noastre.

După cum accentuează și profesorul doctor în științe tehnice S. I. Kornițki în recenzia sa *(Za ekonomia topliva*, 1950, nr. 10, p. 74—76), în afară de exemple cu date

din echipamentul mai recent din U.R.S.S., ar fi de dorit completări cu concluziile ce se pot trage din analiza indicilor tehnico-economici de funcţionare asupra datelor de proiectare şi construcţie a noului utilaj. Aceasta în special relativ la comportarea la alte sarcini decît cele ale zonelor optime, adică în ceea ce priveşte menţinerea unui randament ridicat pentru cele mai largi zone de regim. De asemenea ar fi bine venită o îmbogăţire a materialului în ceea ce priveşte problema reglării supraîncălzirii aburului ca important parametru de funcţionare.

O carte atît de folositoare va apare desigur în noi ediţii şi o aşteptăm completată în special cu date în legătură cu noul echipament, care este deja montat sau în curs de montaj în unele din marile noastre centrale.

În ceea ce priveşte editarea traducerii, este de observat că în general este mulţumitoare, marcînd un progres net în această privinţă, mai ales că este vorba de un material pretenţios; sînt totuşi de remarcat încă unele lipsuri în folosirea termenilor celor mai adecvaţi, ca de exemplu turbogenerator folosit în sens de grup turbogenerator, grup cu termoficare în loc de grup de termoficare, putere calorică în loc de putere calorifică, deşi citeodată ultima expresie este şi ea utilizată (p. 290) pentru a fi iar părăsită (p. 291). De asemenea se poate realiza încă un progres însemnat în modul de execuţie al scrisului din figuri.

În concluzie, apariţia acestei traduceri va aduce o contribuţie importantă în acţiunea de ameliorare a economiei exploatării centralelor noastre termoelectrice şi cartea trebuie recomandată călduros tuturor inginerilor şi tehnicienilor de această specialitate, începînd de la secţiile corespunzătoare din centrale şi pînă la cele mai înalte organe de îndrumare şi control din Energotrusturi şi Ministerul Energiei Electrice şi Industriei Electrotehnice. Totdeodată, prin modul ei de prezentare, cartea constituie un material didactic de o valoare deosebită pentru studenţii facultăţilor de energetică din Institutele superioare de învăţămînt.

Ioan D. Stăncescu

V. T. ŢVETKOV, *Dvigateli b nutrenego sgorania (construcţia i proşciot).* [*(Motoare cu ardere internă (construcţie şi calcul)*]. Masghiz, Kiev, 1953.

Lucrarea profesorului V. T. Ţvetkov, *Motoare cu ardere internă*, este destinată studenţilor ce se vor preocupa cu proiectarea motoarelor de diverse tipuri, cu excepţia celor de aviaţie.

Cartea, scrisă într-o formă deosebită faţă de reţetele clasice, corespunde întru totul scopului reuşind să facă legătură cauzală între fenomenele petrecute în motor şi soluţia constructivă adoptată.

După cum indică însuşi autorul, lucrarea are două părţi distincte: construcţia şi calculul motoarelor cu ardere internă. După o trecere în revistă din punct de vedere istoric al dezvoltării construcţiei de motoare cu ardere internă în Rusia şi apoi în U.R.S.S., autorul trece la o descriere documentată şi comparativă a motoarelor de automobil şi tractoare cu carburator, pe care o încheie cu o precizare a viitoarelor tendinţe de dezvoltare a construcţiei acestor tipuri de motoare, concluzii care sedimentează noianul cunoştinţelor acumulate, scoţînd în evidenţă problemele principale. Cu aceeaşi metodă clară şi documentată este expus capitolul referitor la motoare de automobil şi tractoare fără compresor, cu aprindere prin compresie. Capitolul este consacrat specificei probleme a motoarelor uşoare de transport — răcirea materialului fiind axat pe răcirea cu lichid, singura utilizată în industria motoarelor de transport sovietice.

În continuare sînt descrise motoarele staţionare mari, ca şi cele navale, cu aprindere prin compresie, insistîndu-se asupra particularităţilor lor constructive ca urmare a condiţiilor proprii de funcţionare, pentru ca într-un alt capitol să se insiste asupra perspectivelor căilor de dezvoltare ulterioară a acestor tipuri de motoare. Prima parte a cărţii se încheie cu problema ungerii motoarelor, exemplificînd particularităţile diverselor tipuri de motoare, fără a ataca teoria hidrodinamică a ungerii, expusă în alte tratate de specialitate.

În ansamblu, partea constructivă ocupă peste patru cincimi din lucrare. Restul paginilor este consacrat calculului eforturilor ce solicită motorul.

De relevat metoda proprie a profesorului Ţvetkov de sistematizare şi de expunere a noţiunilor, diferită de soluţiile clasice utilizate în acest domeniu. Astfel partea a doua începe prin metoda de determinare a eforturilor produse de solicitările termice, atît de des şi de intens întîlnite în motoare, după care se studiază oboseala materialului datorită solicitărilor alternante. Prin aceasta, profesorul Ţvetkov renunţă la vechile relaţii

de calcul folosite, utilizînd metode mai precise care ţin seama de comportarea reală a materialului; pentru a exemplifica cele expuse, se face calculul efectiv al organelor principale ale motorului ca: bielă, piston, arbore, etc. O deosebită atenţie este acordată sistemului de distribuire, neglijat în majoritatea tratatelor de specialitate, cu toată importanţa sa.

Partea a doua a acestei lucrări se încheie cu un studiu original şi instructiv asupra modului de alegere a dimensiunilor principale ale motorului, în funcţie de variaţia diverşilor parametri constructivi care caracterizează o familie de motoare.

Pentru prima oară apare, în literatura de specialitate, un calcul de rigiditate al motorului, fenomen care asigură lunga funcţionare a acestuia.

Lucrarea expune în ultimul capitol aprinderea, analizînd avantagiile şi dezavantagiile diverselor scheme.

În concluzie lucrarea profesorului Ţ v e t k o v este un manual de bază în mîna viitorilor proiectanţi de motoare cu ardere internă, care se impune printr-un bogat şi variat material documentar, prin explorarea relaţiilor strînse între fenomenele fizice ce au loc în motor şi soluţia constructivă, dar mai ales prin metodele moderne de calcul utilizate, aclimatizînd astfel pe student cu realitatea birourilor de proiectare ale uzinelor de specialitate.

V. Pimsner

M. H. KARAPETIANŢ, *Termodinamica chimică*. Ed. tehnică, Bucureşti, 1953.

Lucrarea se adresează studenţilor institutelor de învăţămînt superior, specialitatea chimie tehnologică. Mai poate servi şi inginerilor tehnologi, colaboratorilor ştiinţifici şi proiectanţilor din diferite ramuri ale industriei chimice şi în special din industria chimică de bază şi de prelucrare a combustibililor.

Datorită faptului că se adresează în special viitorilor ingineri, s-a căutat să se evite pe cît posibil o expunere abstractă şi teoretică. Acest considerent a condus la accentuarea deosebită a sensului fizic al fenomenelor şi a importanţei lor practice, renunţîndu-se la tratarea formal matematică. În expunerea mterialului s-a acordat o deosebită atenţie termodinamicii sistemelor gazoase şi mai ales calculului echilibrului chimic. Nu s-a insistat asupra soluţiilor şi asupra soluţiilor de electroliţi.

La sfîrşitul primului capitol se dă o listă cu noţiunile cele mai folosite şi cu unităţile de măsură respective. În text aceste unităţi nu mai sînt menţionate decît atunci cînd ele nu coincid cu cele specificate anterior. Lucrarea are XVI capitole.

Se cuvine să remarcăm tratarea foarte clară şi justă a reversibilităţii şi probabilităţii termodinamice. Autorul combate judicios concluziile false la care se poate ajunge, prin aplicarea la univers a noţiunilor termodinamice fundamentale, care figurează în principiul creşterii entropiei.

Astfel acceptarea posibilităţii morţii termice a universului este complet nejustificată, deoarece mişcarea nu poate fi creată şi este indestructibilă, ca însăşi materia.

Capitolele: XIV. Echilibrul chimic pe baza principiului întîi şi al doilea al termodinamicii; XV. Echilibrul chimic şi principiul al treilea al termodinamicii; XVI. Bazele calculului cuanto-statistic al funcţiilor termodinamice şi al echilibrului chimic cu ajutorul datelor spectroscopice, sînt un deosebit ajutor pentru termotehnicieni la înţelegerea mecanismului chimic al arderii şi al calculului arderii cu disociaţie.

Alături de multe ecuaţii pur termodinamice care nu prezintă totdeauna o valoare practică, deoarece uneori se referă la mărimi care se cunosc numai aproximativ sau deloc, autorul dă numeroase reguli empirice şi semiempirice care permit obţinerea uşoară a rezultatelor cu o exactitate suficientă pentru scopurile practice.

Pentru adîncirea şi asimilarea cunoştinţelor date prin lucrarea de faţă, s-a acordat o mare atenţie aplicaţiilor numerice, dintre care o parte sînt date în text, sub formă de probleme rezolvate, iar cealaltă parte la sfîrşitul cărţii sub formă de probleme propuse spre rezolvare.

Pe cît a fost posibil, calculele au fost astfel alese, încît rezultatele obţinute să poată fi comparate cu datele experimentale. Majoritatea aplicaţiilor sînt luate din tehnologia industriilor anorganice şi tehnologia prelucrării chimice a combustibililor.

Numeroase diagrame şi tabele construite pe baza datelor concrete măresc importanţa lucrării. În tabele sînt date principalele proprietăţi ale numeroaselor substanţe şi ele constituie materialul necesar efectuării diverselor calcule numerice, pe lîngă faptul că sînt un mijloc de ilustrare a unor anumite pasagii din text.

O bibliografie bogată este dată la sfîrşitul cărţii, astfel că se uşurează înţelegerea şi adîncirea diferitelor probleme tratate. Pe lîngă aceasta sînt puse la dispoziţia cititorului, chiar în text, referinţe asupra literaturii de consultat.

Ca părţi negative ale traducerii lucrării apărută în Editura tehnică trebuie remarcate următoarele:

— nu s-au folosit notaţiile standardizate pentru diversele mărimi termodinamice, de exemplul lucrul mecanic s-a notat cu A în loc de L, entalpia cu H în loc de I etc.;

— în text s-au strecurat numeroase greşeli de tipar nesemnalate în erată, ca de exemplu la p. 27 s-a scris $dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V dT. \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T dV$, în loc de $dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T dV$,

Este de remarcat faptul că recent au apărut o serie de tabele cu valori mai precise pentru proprietăţile aburului şi gazelor ale profesorului Vukalovici, pe care autorul nu le-a avut la îndemînă atunci cînd a scris lucrarea.

V. Ghia

R. N. BRENNER, *Montarea instalaţiilor de încălzire, de alimentare cu căldură şi cu gaz şi de ventilaţie*. Ed. tehnică, Bucureşti, 1953.

Lucrarea de faţă se adresează studenţilor institutelor tehnice de construcţii ce vor lucra în domeniile: *Alimentarea cu căldură şi gaze* şi *Ventilaţia instalaţiilor*. Totuşi poate fi deosebit de utilă atît proiectanţilor cît şi executanţilor.

În prima parte a lucrării se studiază în special tehnologia executării lucrărilor de montare referitor la sistemele de încălzire şi alimentare cu căldură. Aci se pot distinge următoarele capitole: I. *Conducte*; II. *Prelucrarea ţevilor*; III. *Sudura ţevilor*; IV. *Metoda industrială de prefabricare a pieselor conductelor*; V. *Instalarea armăturii de închidere şi de reglaj*; VI. *Instalarea cazanelor de încălzire şi a schimbătorilor de căldură*; VII. *Montarea diferitelor elemente ale instalaţiei de încălzire*; VIII. *Instalarea radiatoarelor*; IX. *Asamblarea instalaţiilor de încălzire centrală*; X. *Asamblarea reţelelor de încălzire la distanţă şi a reţelelor de gaze*; XI. *Izolarea conductelor*; XII. *Pornirea instalaţiilor de încălzire şi de alimentare cu căldură*.

În partea a doua a lucrării, în sensul celor amintite anterior, se studiază ventilaţia. Extinderea acestei părţi faţă de întreaga lucrare este de aproximativ o treime, avînd şapte capitole:

XIII. *Canale de ventilaţie din plăci de zgură şi de ipsos*; XIV. *Canale de aer din tablă de oţel*; XV. *Instalarea ventilatoarelor*; XVI. *Instalarea dispozitivelor de reglaj*; XVII. *Instalarea bateriilor de încălzire şi a filtrelor*; XVIII. *Instalarea utilajului în camere de tratare a aerului*; XIX. *Pornirea, punerea la punct şi reglarea instalaţiilor de ventilaţie*.

Operaţiile manuale sînt descrise pe scurt; atenţia principală se acordă proceselor mecanizate, totuşi sînt descrise numai lucrările cele mai importante, cadrul lucrării nepermiţînd o extindere mai mare. Sînt date soluţiile principiale ale diferitelor probleme, urmărindu-se în special orientarea gîndirii tehnice la un nivel superior corespunzător cerinţelor moderne. Sînt scoase de asemenea în relief cauzele fenomenelor care se întîlnesc în practică la lucrările de montare şi sînt explicate motivele care au servit drept bază pentru prescrierea normativelor.

Se analizează nu numai metodele de montare a elementelor principale ale sistemelor de încălzire şi de ventilaţie dar şi metodele de determinare a calităţii acestor elemente. Datorită noutăţilor prezentate şi lipsei complicaţiilor matematice, lucrarea se citeşte uşor şi repede.

Pentru uşurarea înţelegerii şi adîncirii problemelor tratate, la sfîrşitul cărţii este dată o bogată bibliografie. Traducerea în româneşte a acestei lucrări apărută în Editura tehnică în unele locuri nu s-a efectuat în modul cel mai adecvat. Însuşi titlul sub care a apărut confirmă această afirmaţie.

V. Ghia

ABONAMENTELE SE FAC LA OFICIILE POŞTALE,
PRIN FACTORII POŞTALI ŞI DIFUZORII VOLUNTARI
DIN ÎNTREPRINDERI ŞI INSTITUŢII

ÎNTREPRINDEREA
POLIGRAFICĂ Nr. 4
BUCUREŞTI

C. 1291

Preţul lei 10